

Étude N°2023-05 Spatialisation des impacts en ACV

Rapport final
Septembre 2024

Version finale	13 septembre 2024	
Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Georg SEITFUDEM Pablo TIRADO SECO Ivan VIVEROS SANTOS	Cécile BULLE Laure PATOUILLARD Julien PEDNEAULT	François SAUNIER

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, 2024, 179 pages, n°2023-05.

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.

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les résultats du projet « Spatialisation des impacts en ACV », mené par le CIRAIG pour ScoreLCA. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité des études initiées par ScoreLCA il y a une dizaine d'années sur l'intégration de la dimension géographique en ACV. L'étude avait pour objectif d'évaluer la spatialisation des impacts en analyse du cycle de vie (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 ;
- La diffusion des résultats à un public élargi.

L'étude met en lumière la nécessité d'adopter une terminologie standardisée pour l'introduction des dimensions spatiales en ACV. Dans ce cadre, le concept de « spatialisation des impacts » désigne l'attribution d'une dimension géographique aux impacts, qu'il s'agisse de l'origine ou de la destination. Cette opération repose sur la combinaison de l'inventaire spatialisé avec des facteurs de caractérisation (FC) régionalisés natifs, agrégés, ou spécifiques à l'origine-destination selon l'étendue spatiale de la catégorie d'impact.

De plus, ce rapport souligne également l'importance d'utiliser des FC régionalisés natifs, agrégés à l'échelle de l'inventaire. Cette approche garantit une évaluation environnementale plus précise, adaptée à l'échelle géographique des processus modélisés. Toutefois, les outils ACV actuels ne permettent pas de traiter simultanément l'origine et la destination des impacts. Par conséquent, l'intégration d'algorithmes de systèmes d'information géographique (SIG) est essentielle pour permettre ce type de calcul.

L'étude de cas, axée sur l'analyse de l'impact environnemental d'un produit quotidien (shampooing), démontre que la régionalisation des inventaires et des méthodes d'ÉICV, comme IMPACT World+ et AWARE, améliore considérablement la précision des résultats, notamment pour les indicateurs liés à la consommation d'eau.

Les recommandations formulées visent les développeurs de méthodes d'impact, les concepteurs de logiciels ACV et les praticiens. Elles mettent l'accent sur l'importance d'intégrer des données régionalisées, tant pour les inventaires que pour les FC, d'utiliser des outils SIG, et de définir des échelles géographiques appropriées à chaque étude. Ces mesures sont cruciales pour améliorer la représentativité des résultats et mieux refléter la variabilité géographique des impacts environnementaux.

En conclusion, ce projet réaffirme l'importance de la spatialisation des impacts en ACV et fournit des recommandations pour surmonter les défis techniques et méthodologiques dans ce domaine en constante évolution.

MOTS CLÉS

Spatialisation des impacts, Régionalisation des impacts, Facteurs de caractérisation régionalisés, Inventaire régionalisé.

SUMMARY

This report presents the findings of the "Spatialization of Impacts in LCA" project, conducted by CIRAIG and commissioned by ScoreLCA. This work builds on research initiated by ScoreLCA approximately ten years ago, focusing on the integration of geographic dimensions in Life Cycle Assessment (LCA). The primary objective of the project was to assess the spatialization of impacts in LCA through a review of existing methods, a case study, and practical recommendations for LCA practitioners and developers.

The specific objectives of the project were to:

- Conduct a state-of-the-art review of the integration of geographic dimensions in LCA.
- Perform a case study to illustrate operational challenges.
- Develop recommendations for practitioners and LCIA method developers.
- Disseminate findings to a broader audience.

The study highlights the need for standardized terminology when incorporating spatial dimensions into LCA. "Impact spatialization" refers to the assignment of a geographic dimension to impacts, whether related to their origin or destination. This process involves combining spatialized inventories with regionalized characterization factors (CFs)—whether native, aggregated, or specific to the origin-destination—depending on the spatial span of the impact category.

Additionally, the report emphasizes the importance of using native regionalized CFs, aggregated at the inventory level. This approach enables more accurate environmental assessments, better aligned with the geographic scale of the modeled processes. However, current LCA software lacks the capability to address both the origin and destination of impacts simultaneously, making the integration of Geographic Information System (GIS) algorithms essential for such calculations.

A case study on the environmental impact of a common product (shampoo) demonstrates that regionalizing inventories and LCIA methods, such as IMPACT World+ and AWARE, significantly enhances the accuracy of results, particularly for indicators related to water consumption.

The recommendations are aimed at method developers, LCA software designers, and practitioners. They underscore the importance of integrating regionalized data for both inventories and CFs, utilizing GIS tools, and establishing appropriate geographic scales for each study. These measures are critical for improving the representativeness of results and accurately reflecting the geographic variability of environmental impacts.

In conclusion, this project reaffirms the importance of spatializing impacts in LCA and offers actionable recommendations to overcome the technical and methodological challenges in this evolving field.

KEY WORDS

Impact spatialization, impact regionalization, regionalized characterization factors, regionalized inventory.

Table des matières

RÉSUMÉ	3
SUMMARY	4
Table des matières	5
Liste des figures	8
Liste des tableaux.....	15
Liste des acronymes.....	17
1. Contexte et objectifs de l'étude	19
2. Introduction aux concepts relatifs à la spatialisation des impacts.....	20
2.1 Terminologie de base	20
2.2 Vue d'ensemble des concepts	20
2.2.1 Définition des concepts.....	21
2.2.2 Étapes de la spatialisation des impacts.....	22
2.2.3 Principales motivations menant à la spatialisation des impacts.....	23
2.3 Principales caractéristiques de la régionalisation des impacts	23
2.3.1 Différents types de régionalisation des impacts	23
2.3.2 Calcul de FC régionalisés natifs	24
2.3.3 Calcul de FC régionalisés agrégés.....	25
2.3.4 Étendues spatiales différentes selon les catégories d'impact	26
2.3.5 Spécificités de la régionalisation des catégories d'impact globaux et locaux	27
2.4 Principales caractéristiques de la spatialisation de l'inventaire.....	27
2.4.1 Nature de l'information géographique	27
2.4.2 Méthodes de spatialisation	28
2.5 Principales caractéristiques de la spatialisation des impacts.....	28
2.5.1 Calcul d'impact spatialisé	28
2.5.2 Opérationnalisation dans les logiciels.....	28
2.5.3 Interprétation des scores d'impact spatialisé : « origine » versus « destination »	30
3. État de l'art sur la spatialisation des impacts en ACV.....	33
3.1 Identification des enjeux méthodologiques et limites actuelles.....	33
3.2 Définition des objectifs et du champ de l'étude	33
3.3 Inventaires régionalisés.....	35
3.3.1 Bases de données	37
3.3.2 Développements récents dans la régionalisation et spatialisation de l'inventaire (revue de littérature)	39
3.4 Méthodes d'évaluation des impacts de cycle de vie	45

3.4.1	Revue des méthodes d'ÉICV les plus récentes	50
3.4.2	Développements récents dans la régionalisation des impacts (revue de littérature)	58
3.4.3	Autres développements intéressants.....	60
3.5	Opérationnalisation.....	62
3.5.1	Enjeux sur l'opérationnalisation de l'ACV régionalisée dans les logiciels	62
3.5.2	Revue des logiciels et outils	66
3.5.3	Développements récents dans l'opérationnalisation (revue de littérature).....	82
3.6	Interprétation	83
3.6.1	Enjeux liés à la phase d'interprétation	83
3.6.2	Développements récents dans la phase d'interprétation.....	84
4.	Revue des exigences réglementaires et normatives	86
5.	Étude de cas.....	88
5.1	Description générale de l'étude de cas	88
5.2	Base de données.....	91
5.3	Description des outils utilisés	91
5.3.1	SimaPro	92
5.3.2	openLCA.....	92
5.3.3	Brightway	92
5.4	Description des analyses menées.....	93
5.5	Modélisation du système avec SimaPro	96
5.5.1	Méthodologie de régionalisation des impacts.....	96
5.5.2	Analyse des résultats globaux de l'ACV	98
5.5.3	Analyse des résultats avec ICV régionalisé	99
5.5.4	Analyse des résultats avec ÉICV régionalisée	101
5.5.5	Analyse de résultats avec FC natifs	104
5.5.6	SimaPro Flow.....	106
5.5.7	Principales conclusions	107
5.6	Modélisation du système avec openLCA	108
5.6.1	Méthodologie de régionalisation des impacts.....	109
5.6.2	Analyse des résultats globaux de l'ACV	110
5.6.3	Analyse des résultats avec ICV régionalisé	112
5.6.4	Analyse des résultats avec ÉICV régionalisée	114
5.6.5	Analyse de résultats avec FC à résolution spatiale native	116
5.6.6	Principales conclusions	120
5.7	Modélisation du système avec Brightway	122
5.7.1	Méthodologie de régionalisation des impacts.....	122

5.7.2	Analyse des résultats globaux de l'ACV	127
5.7.3	Analyse des résultats avec ICV régionalisé	130
5.7.4	Analyse des résultats avec ÉICV régionalisée	132
5.7.5	Principales conclusions	144
5.8	Conclusions générales de l'étude de cas	145
6.	Conclusions et recommandations	147
6.1	Synthèse des enjeux traités et recommandations	147
6.1.1	Calcul de FC régionalisés	147
6.1.2	Calcul d'ACV régionalisée	148
6.1.3	Opérationnalisation de l'ACV régionalisée	149
6.1.4	Interprétation de l'impact spatialisé	150
6.2	Conclusion	152
7.	Références	153
8.	Annexes.....	165
8.1	Détail du calcul des FC agrégés dans IMPACT World+	165
8.2	Méthodes d'ÉICV les plus récentes	166
8.3	Fichier de données	174
8.4	Création d'une catégorie d'ÉICV à partir de données géospatiales dans openLCA.....	175
8.5	Brightway	177
8.5.1	Installation.....	177
8.5.2	Importation de la méthode IMPACT World+.....	177
8.5.3	Importation de projets	178
8.5.4	Création de la base de données Regoinvent.....	178
8.5.5	Calcul d'ACV régionalisée par spatialisation des flux élémentaires dans Brightway	179
8.5.6	Utilisation de Librairies Complémentaires à Brightway	179

Liste des figures

Figure 1. Les 2 modules du projet et leurs livrables associés.....	19
Figure 2. Étapes de la spatialisation des impacts, avec les couleurs indiquant les différentes échelles.	23
Figure 3. Types de régionalisation des impacts	24
Figure 4. Régionalisation des impacts dans le cas des modèles multirégionaux pour le calcul de FC régionalisés « origine-destination » et « natifs »	25
Figure 5. FC pour l'évaluation de la catégorie Water scarcity [m ³ world eq. /m ³ consommées dans la région i] dont l'échelle native est au niveau des bassins versants. Zoom sur la France Métropolitaine, basée sur Boulay et al. (2018).....	25
Figure 6. Calcul de FC régionalisés agrégés dans le cas des modèles multirégionaux.....	26
Figure 7. Étendue spatiale de la catégorie d'impact	26
Figure 8. Opérationnalisation de la spatialisation de l'inventaire et des impacts dans SimaPro (générique)	29
Figure 9. Opérationnalisation de la spatialisation de l'inventaire et des impacts par localisation géospatiale, notamment dans le cas de bw2-regional et openLCA.	29
Figure 10. Étapes de la spatialisation des impacts.	32
Figure 11. Une ACV régionalisée avec des impacts « destination » versus analyse de risque : étendu et enjeux environnementaux considérés.....	34
Figure 12. Analyse comparative entre les véhicules électriques et conventionnel après 150000 km. a) Changement climatique (10 ⁴ kg CO ₂ éq) et b) Épuisement des ressources minérales (10 ³ kg). Adapté de Roy et al. (2016).	35
Figure 13. Émissions d'un véhicule électrique (g CO ₂ éq/km) lors de la phase d'utilisation.....	35
Figure 14. Empreinte carbone de la production d'aluminium primaire selon des régions définies dans ecoinvent 3.9.	36
Figure 15. FC pour l'évaluation de la rareté d'eau [m ³ world eq./m ³ consommées dans la région i]. Moyenne arithmétique sur douze mois. Zoom sur les États-Unis, basée sur Boulay et al. (2018).	46
Figure 16. Chronologie non exhaustive des catégories d'impact régionalisées et des méthodes d'ÉICV.	46
Figure 17. Niveau de régionalisation des modèles d'ÉICV. Adapté de Patouillard (2018).	47
Figure 18. Impact du niveau d'agrégation sur l'incertitude liée à la variabilité spatiale : exemple du FC de l'acidification terrestre du dioxyde de soufre (SO ₂) aux échelles de résolution mondiale, continentale et nationale. Les diagrammes en boîte à moustaches représentent les 5e, 25e, 75e et 95e percentiles ainsi que la médiane dans chaque région (Bulle et al., 2019).	48
Figure 19. Impacts mondiaux du CO ₂ sur les espèces de poissons d'eau douce au niveau du bassin versant pour quatre RCP (Representative Concentration Pathways, Profils représentatifs d'évolution de concentration). Tiré de Li et al., (2022)	50
Figure 20. Indicateurs inclus dans IMPACT World+ (Bulle et al., 2019). Les indicateurs régionalisés sont identifiés dans un encadré orange.	51

Figure 21. Indicateurs inclus dans ReCiPe2016. Les indicateurs régionalisés sont identifiés dans un encadré orange. Adapté de Huijbregts et al. (2017)	53
Figure 22. Indicateurs inclus dans LC-IMPACT. Les indicateurs régionalisés sont identifiés dans un encadré orange. Adapté de Verones et al. (2020).	55
Figure 23. Spatialisation selon la destination des impacts du changement climatique court-terme sur la santé humaine (DALY) par pays, selon l'unité fonctionnelle : « Un lavage de cheveux effectué en France sur des cheveux de longueur moyenne ». Notre représentation basée sur les travaux de (Mouhoub & Bulle, 2024).....	62
Figure 24 : FC régionalisés dans IMPACT World+ (haut) et ReCiPe 2016 (H) (bas) pour openLCA. .	63
Figure 25 : Spatialisation des flux élémentaires liés à l'acidification pour un processus de la base de données ecoinvent.	64
Figure 26. FC pour l'évaluation de la rareté d'eau [m ³ world eq./m ³ consommées dans la région i]. Moyenne arithmétique sur douze mois. La figure présente un zoom sur les États-Unis (panneau à gauche), basée sur Boulay et al. (2018) et localise deux parcelles fictives : l'une à Napa, Californie, et l'autre à Brown Corners, Vermont (panneau en haut à droite). Les FC pour ces parcelles sont déterminés par l'intersection spatiales avec la couche de FC de la méthode AWARE et sont comparés au FC agrégé pour l'ensemble des États-Unis (panneau en bas à droite).	65
Figure 27. FC pour évaluer la rareté d'eau associée au flux « Water, FR » dans openLCA, utilisant la méthode d'ÉICV IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).	65
Figure 28. Exemple du flux d'élémentaire « Water, FR » du processus Grape production {FR} dans SimaPro®.	67
Figure 29. Exemple du FC pour évaluer la rareté d'eau associée au flux d'eau dans SimaPro®.	68
Figure 30. Exemple du flux élémentaire « Water, FR » du processus « Grape production {FR} » dans SimaPro Flow®.....	68
Figure 31. Exemple du FC pour évaluer la rareté d'eau pour caractériser le flux d'eau dans SimaPro Flow®.....	69
Figure 32. Pour obtenir des résultats d'impacts spatialisés dans le calcul d'ACV, il est nécessaire de sélectionner à la fois l'analyse détaillée et les résultats régionalisés dans la configuration de calcul. .	69
Figure 33. Exemple de flux élémentaires spatialisés dans un processus dans le logiciel LCA for experts (GaBi)	70
Figure 34. Exemple des copies de flux d'eau dans LCA for experts (GaBi).	70
Figure 35. Intégration de FC régionalisés pour l'occupation de terres de la méthode EF 3.1 dans LCA for experts (GaBi).	71
Figure 36. Exemple du flux d'élémentaire « Water » du processus « Grape production » dans Activity-Browser.....	72
Figure 37. Exemple du flux d'élémentaire « Water, FR » du processus « Grape production » dans Activity-Browser. La spatialisation des flux d'eau est intégrée à la méthode IMPACT World+ v2.0.1..	72
Figure 38. ACV régionalisée dans Brightway avec la librairie bw2regional.	73
Figure 39. Exemple du flux d'élémentaire « Water, FR » du processus « Grape production – FR » dans openLCA.....	74
Figure 40. Détail du FC pour évaluer la rareté d'eau (Water scarcity) pour caractériser le flux « Water, FR » dans openLCA.	74

Figure 41. Importation de FC régionalisés sous forme de fichier GeoJSON.	75
Figure 42. FC pour évaluer la rareté d'eau (Water scarcity) pour caractériser le flux « Water, FR » importés dans openLCA.	76
Figure 43. Calcul des FC agrégés pour les régions sélectionnées.	76
Figure 44. Interface du logiciel QGIS montrant le fichier vectoriel des FC régionalisés pour l'évaluation de la rareté d'eau (Boulay et al., 2018).	78
Figure 45. Affichage des FC régionalisés pour l'évaluation de la rareté d'eau [m ³ world eq./m ³ consommées dans la région i]. Moyenne arithmétique sur douze mois (Boulay et al., 2018).	79
Figure 46. Couche spatiale englobant les caractéristiques environnementales et socio-économiques essentielles dans les évaluations d'ACV et d'empreinte écologique. Adapté de Pfister et al., (2020) .	80
Figure 47 : Illustration du cycle de du shampoing à l'étude.	88
Figure 48. Système de produit comportant les principales étapes du cycle de vie du shampoing.	89
Figure 49. Étapes de modélisation de l'étude de cas dans Brightway.	93
Figure 50. 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.	93
Figure 51. Processus influencés par le paramètre ICV_regio, incluant ceux relatifs aux ingrédients du shampoing, à l'eau et à la phase d'utilisation du shampoing. L'exemple de l'alcool isopropylique illustre comment le paramètre ICV_regio fonctionne comme un interrupteur, permettant de basculer entre des processus spécifiques à l'étude de cas en Europe et des processus globaux ou RoW.	94
Figure 52. Exemple de FC pour l'utilisation de l'eau et des terres selon la méthode EF 3.1, telle qu'implémentée dans le logiciel Brightway et accessible via l'Activity Browser.	95
Figure 53. Analyse de contribution des impacts liés aux aires de protection, classées par catégories d'impacts endpoint : (a) Human health et (b) Ecosystems quality, selon la méthode IMPACT World+ pour l'implémentation de base dans SimaPro avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires. Les catégories avec un motif quadrillé indiquent des catégories avec des FC régionalisés et flux d'ICV spatialisés. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.	98
Figure 54. Contribution par catégorie des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire non-régionalisé pour la méthode IMPACT World+. Les catégories avec un motif quadrillé indiquent des catégories avec des FC régionalisés et flux d'ICV spatialisés. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.	99
Figure 55 : Contribution des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire régionalisé pour la méthode IMPACT World+. Les catégories avec un motif quadrillé indiquent des catégories avec des FC régionalisés et flux d'ICV spatialisés. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.	100
Figure 56. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé à un niveau de régionalisation faible de l'ICV. Le calcul est réalisé avec la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Endpoint et repose sur l'implémentation de SimaPro avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires.	101
Figure 57 : Arbre de processus SimaPro. Contribution à la catégorie Land transformation, biodiversity.	102

Figure 58 : Modification de processus dans SimaPro pour augmenter la représentativité via la spatialisation des flux élémentaires.....	103
Figure 59: Contribution des étapes du cycle de vie pour l'aire de protection Ecosystem Quality avec l'inventaire régionalisé et spatialisation des flux les plus contributeurs pour la méthode IMPACT World+ version Expert.....	103
Figure 60 : Contribution à la catégorie Water scarcity par étape du cycle de vie. Calculée avec IMPACT World+ 2.0.1 version Midpoint.....	104
Figure 61 : Création dans SimaPro d'un nouveau flux élémentaires spatialisés pour l'extraction d'eau dans la région de Paris.....	105
Figure 62 : Ajout des nouveaux FC régionalisés natifs à une copie de la méthode IMPACT World+ dans SimaPro.....	105
Figure 63 : Résultats par étape du cycle de vie pour la catégorie Water scarcity à l'échelle du pays et à l'échelle native (Paris et Montpellier). Calculé avec IMPACT World+ 2.0.1 version Midpoint.	106
Figure 64 : FC régionalisés pour la catégorie Freshwater eutrophication de la méthode ÉICV LC-IMPACT dans SimaPro flow.....	107
Figure 65 : Exemple de flux spatialisés dans un processus ecoinvent dans openLCA.....	108
Figure 66. Analyse de contribution des impacts liés aux aires de protection, classées par catégories d'impacts endpoint : (a) Human health et (b) Ecosystems quality, selon la méthode LC-IMPACT pour l'implémentation de base dans openLCA avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles.	110
Figure 67. Contribution par catégorie des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire non-régionalisé pour la méthode LC-IMPACT. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.	111
Figure 68 : Détails de l'onglet Locations pour l'indicateur Freshwater eutrophication de la méthode LC-IMPACT calculé avec openLCA avec des FC globaux.....	112
Figure 69. Contribution des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire régionalisé pour la méthode LC-IMPACT. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.	113
Figure 70. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation moyen (régionalisation de l'ICV et FC non-régionalisés) à un niveau de régionalisation faible de l'ICV et FC non régionalisés. Le calcul est réalisé avec la méthode LC-IMPACT et repose sur l'implémentation d'openLCA avec la base de données ecoinvent 3.9.1.....	114
Figure 71. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé (régionalisation de l'ICV et FC régionalisés) à un niveau de régionalisation faible de l'ICV et FC non régionalisés. Le calcul est réalisé avec la méthode LC-IMPACT et repose sur l'implémentation d'openLCA avec la base de données ecoinvent 3.9.1.....	115
Figure 72 : Comparaison des résultats pour l'indicateur Marine eutrophication de la méthode LC-IMPACT calculé avec openLCA avec des FC globaux (a. FC GLO) et FC régionalisés (b. FC régionalisés).....	116
Figure 73 : Création d'une nouvelle localisation dans openLCA.....	117
Figure 74: Assignation d'une nouvelle localisation à un processus dans openLCA.....	118
Figure 75 : Calcul et intégration des nouveaux FC régionalisés.....	119

Figure 76 : Comparaison de résultats avec la méthode AWARE pour trois échelles de régionalisation des FC (Globale, agrégée par pays et agrégée à une plus faible échelle).....	120
Figure 77 : Carte de résultats pour le scénario de consommation à Montpellier.....	120
Figure 78. Intégration du modèle ACV pour l'utilisation du shampoing dans le logiciel Brightway 2 : a) Implémentation de base dans Brightway avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires. b) Implémentation avec ecoinvent 3.9.1, incluant la spatialisation des flux d'eau. c) Implémentation avec Regioinvent et ecoinvent 3.9.1, incluant la spatialisation des flux d'eau, de terres, ainsi que des flux associés aux impacts d'acidification et d'eutrophisation.	122
Figure 79. Processus de marché de l'eau adapté au contexte français, extrait de la base de données ecoinvent 3.9.1, avec détails sur certains flux élémentaires issus de la base de données biosphere3 dans Brightway. Les informations sont visualisées à l'aide de l'Activity Browser.	123
Figure 80. Système de produit comportant les principales étapes du cycle de vie de l'utilisation du shampoing tel que modélisé dans l'Activity-Browser	124
Figure 81. Pour la deuxième implémentation du modèle, les flux d'eau ont été spatialisés en utilisant une version d'ecoinvent 3.9.1 avec des flux d'eau spatialisés. Certains flux d'eau, dont le processus de marché de l'eau potable en France, ont été spatialisés manuellement.	125
Figure 82. L'utilisation du chlorure de sodium dans la formulation a d'abord été modélisée en utilisant des processus de marché global (ICV_regio = 0) ou des processus européens (ICV_regio = 1). Par la suite, ces processus ont été remplacés par un processus de marché de consommation spécifique au chlorure de sodium.	127
Figure 83. Phase préliminaire du logigramme réaliste pour la mise en œuvre de la régionalisation et la spatialisation de l'inventaire en ACV. Tiré de Patouillard et al. (2015).	127
Figure 84. Analyse de contribution des impacts liés aux aires de protection, classées par catégories d'impacts endpoint : (a) Human health et (b) Ecosystems quality, selon la méthode IMPACT World+ pour l'implémentation de base dans Brightway avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires.	128
Figure 85. Analyse de contribution des processus aux impacts sur la santé humaine pour la catégorie Water scarcity selon la méthode IMPACT World+ et basée sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires.....	129
Figure 86. Diagrammes de Sankey illustrant la contribution des processus aux catégories d'impact : (a) Land transformation, biodiversity et (b) Land occupation, biodiversity. L'analyse est réalisée selon la méthode IMPACT World+ et repose sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires	130
Figure 87. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé à un niveau de régionalisation faible de l'ICV. Le calcul est réalisé avec la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Endpoint et repose sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires.	131
Figure 88. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé à un niveau de régionalisation faible de l'ICV. Le calcul est réalisé avec la méthode EF 3.1 et repose sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires	132
Figure 89. Ratio des impacts environnementaux liés à l'utilisation du shampoing en France, comparant les résultats obtenus avec un inventaire avec des flux d'eau spatialisés (sceWF) à ceux obtenus avec un inventaire sans spatialisation des flux d'eau (sceBase). Le calcul est réalisé avec la méthode IMPACT World+ 2.01 Midpoint.....	133

Figure 90. Impacts liés à la catégorie Water scarcity (rareté de l'eau) associés à l'utilisation du shampoing en France. Cette figure compare les résultats obtenus avec un inventaire sans spatialisation des flux d'eau à ceux obtenus avec un inventaire intégrant la spatialisation des flux d'eau. Les calculs sont réalisés avec la méthode IMPACT World+ 2.01 Midpoint, en utilisant les logiciels Brightway et SimaPro, pour deux niveaux de régionalisation de l'ICV (en utilisant le paramètre ICV_regio). 134

Figure 91. Nombre de connexions aux bases de données ICV pour chaque étape du cycle de vie du shampoing utilisé en France, comparé entre les deux implémentations du modèle : Spatialized WF et Regioinvent. 135

Figure 92. Ratio des impacts environnementaux associés à l'utilisation du shampoing en France. Comparaison des résultats obtenus avec le modèle connecté à RegioInvent et ceux obtenus avec un modèle intégrant la spatialisation des flux d'eau. Les calculs sont effectués selon la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Midpoint..... 136

Figure 93. Ratio des impacts environnementaux associés à l'utilisation du shampoing en France. Comparaison des résultats obtenus avec le modèle connecté à RegioInvent et ceux obtenus avec un modèle intégrant la spatialisation des flux d'eau. Les calculs sont effectués selon la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Endpoint. 137

Figure 94. Diagramme de Sankey montrant les contributions des processus à la catégorie d'impact Land occupation, biodiversity selon la méthode d'ÉICV IMPACT World+ et l'implémentation du modèle ACV avec Regioinvent. 139

Figure 95. Répartition géographique de l'origine des impacts associés à la catégorie d'impact land occupation, basée sur la méthode ÉICV IMPACT World+ et le modèle ACV connecté avec Regioinvent. 139

Figure 96. Treemap des impacts. Présentation hiérarchique des impacts liés à l'occupation des terres, avec un premier niveau représentant les pays d'origine selon la méthode ÉICV IMPACT World+ et le modèle ACV avec Regioinvent. Le deuxième niveau détaille les secteurs des processus, classés selon la base de données ecoinvent 3.9.1..... 140

Figure 97. Répartition géographique de l'origine des impacts associés à la catégorie Water scarcity, basée sur la méthode IMPACT World+ et le modèle d'ACV pour l'utilisation de shampoing, connecté à Regioinvent..... 141

Figure 98. Calcul des FC agrégés par département en France pour évaluer la catégorie water scarcity (rareté de l'eau), utilisant la méthode AWARE intégrée dans la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Midpoint. 142

Figure 99. FC pour l'évaluation de la catégorie water scarcity (rareté de l'eau) [m^3 équivalent mondial/ m^3 consommé dans la région i]. Distribution des FC régionalisés natifs pour la France et des FC agrégés par département, et comparaison avec la valeur unique utilisée pour l'ensemble du pays. 143

Figure 100. Spatialisation et distribution des impacts liés à la catégorie water scarcity (rareté de l'eau) associés au cycle de vie de l'utilisation de shampoing en France [m^3 world eq./unité fonctionnelle]. Les impacts sont évalués selon la méthode IMPACT World+, en tenant compte des conditions d'utilisation dans les départements de la France Métropolitaine. 144

Figure 101. Intersections entre les régions de la résolution native i avec une région d'agrégation j. Tiré de Patouillard (2018) 165

Figure 102 : Exemple d'indicateur avec FC régionalisés avec l'approche géospatiale dans openLCA. 175

Figure 103 : FC régionalisés calculés avec l'approche géospatiale dans openLCA. 176

Figure 104. Importation de la méthode d'ÉICV IMPACT World+ version 2.0.1 dans Brightway 178

Liste des tableaux

Tableau 1. Vue d'ensemble de l'application des concepts de régionalisation et spatialisation pour les phases d'ICV et d'EICV	21
Tableau 2. Interprétation des scores d'impact spatialisés	30
Tableau 3. Type de FC à utiliser par type de spatialisation des impacts « origine » ou « destination »	31
Tableau 4. La dimension spatiale dans diverses bases de données d'ICV.	38
Tableau 5. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la version 2.0.1 de la méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).	52
Tableau 6. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la méthode ReCiPe2016 (Huijbregts et al., 2017).	53
Tableau 7. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la méthode EF3.0 (EPLCA, 2024).....	54
Tableau 8. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la méthode LC-IMPACT (Verones et al., 2020).	55
Tableau 9. Recommandations de GLAM concernant les aspects spatiaux des méthodes d'impact (Frischknecht & Jolliet, 2017, 2019).	56
Tableau 10. Proxies de pondération pour agréger les FC natifs à des échelles nationales, continentales et mondiales pour des catégories d'impact régionalisées (liste non exhaustive adaptée de Mutel et al. 2019). NR : Non régionalisé ; ND : Non disponible	57
Tableau 11. Liste des nouveaux facteurs de caractérisation régionalisés identifiés.	58
Tableau 12. Version des logiciels qui ont été utilisés dans cette section.....	66
Tableau 13. Résumé des caractéristiques des logiciels ACV abordés dans cette section.	77
Tableau 14. Description de données SIG utiles pour la régionalisation des impacts en ACV.....	80
Tableau 15. Caractéristiques de la bouteille de shampoing (Cosmetics Europe, 2016b)	88
Tableau 16. Principales sources des données de l'ICV de l'étude de cas	91
Tableau 17 : Catégories incluses dans IMPACT World+ 2.0.1 expert avec le niveau de régionalisation des FC et sa compatibilité avec les flux élémentaires de la base de données ecoinvent 3.9.1 dans SimaPro	97
Tableau 18 : Comparaison des FC global et spécifique pour la Suisse pour les flux élémentaires spatialisés (PDF.m ² .yr).....	104
Tableau 19 : FC pour la catégorie Water scarcity (AWARE) pour les différentes localisations étudiées (m ³ World eq./m ³). Les FC natifs sont extraits de la carte Google Earth mise à disposition par les développeurs de la méthode AWARE.	105
Tableau 20 : Catégories incluses dans la méthode LC-IMPACT (version All Impacts, Short Term) avec les catégories avec des FC régionalisés	109
Tableau 21. Nombre de FC de la méthode IMPACT World+ 2.0.1 (Bulle et al., 2019) dans l'implémentation de base de Brightway (sans spatialisation des flux élémentaires) et après intégration de la base de données Regioinvent (Agez, 2024).	126

Tableau 22. Niveau de régionalisation des catégories d'impacts orientés problème et dommage dans IMPACT World+ (Bulle et al., 2019). Caractères gras : Nouveau dans ce rapport.....	166
Tableau 23. Catégories d'impact orientées problème et dommage dans ReCiPe 2016 qui incluent un certain niveau de régionalisation (Huijbregts et al., 2017).	169
Tableau 24. Catégories d'impacts orientés problème dans EF (EPLCA, 2024)).....	170
Tableau 25. Catégories d'impacts orientés problème et dommage dans LC-IMPACT qui incluent un certain niveau de régionalisation (Verones et al., 2020).	171

Liste des acronymes

ABM	<i>Agent-based modelling</i> (modélisation basée sur les agents)
ACV	Analyse du cycle de vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADP	<i>Abiotic Depletion Potential</i> (Potentiel d'épuisement abiotique)
AGEC-LCI	<i>AGricultural Emissions Calculator for life cycle inventory</i> (Calculateur d'émissions agricoles pour l'inventaire du cycle de vie)
API	<i>Application Programming Interface</i> (interface de programme d'application)
AWARE	<i>Available WAter REmaining</i> (Eau disponible restante par bassin versant)
BD	Base de données
CFC-11	Trichlorofluoromethane (trichlorofluorométhane)
CH	Switzerland, code ISO2 pour la Suisse
CSM	<i>Commodity supply mix</i> (Composition de l'offre de matières premières)
DALY	<i>Disability-adjusted life year</i> (année de vie ajustée en fonction de l'incapacité)
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
ES	Données d'entrées/sorties
ESDAC	<i>European Soil Data Centre</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FC	Facteur de caractérisation
FR	France, code ISO2 pour la France
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIS	<i>Geographic Information System</i>
GLAM	<i>Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators and Methods</i>
GLO	Global, code ecoinvent
GMRIO	<i>Global Multi-Regional Input-Output</i> (Entrées-sorties multirégionales mondiale)
GREET	<i>Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model</i>
GUI	<i>Graphical user interface</i> (interface utilisateur graphique)
IAM	<i>Integrated Assessment Models</i> (Modèles d'évaluation intégrés)
ICV	Inventaire du cycle de vie
ILCD	<i>International Life Cycle Data system</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KML	<i>Keyhole Markup Language</i>
LCI	<i>Life cycle inventory</i>
LCIA	<i>Life cycle impact assessment</i>
MRIO	<i>Multi-Regional Input Output modeling</i>

NMVOG	<i>Non-methane Volatile Organic Compounds</i> (Composés organiques volatils non méthaniques)
ODP	<i>Ozone depletion potential</i> (Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone)
OEF	<i>Organisation Environmental Footprint</i>
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PCR	<i>Product Category Rules</i>
PDF	<i>Potentially dissapeared fraction of species</i> (Fraction d'espèces potentiellement disparue)
PEF	<i>Product Environmental Footprint</i>
PEFCR	<i>Product Environmental Footprint Category Rules</i>
PIB	Produit intérieur brut
PL	Poland, code ISO2 pour la Pologne
PM	<i>Particulate matter</i>
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (Profils représentatifs d'évolution de concentration)
RER	Europe, code ecoinvent
ROW	Rest of the world (Reste du monde)
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> (Société de toxicologie et de chimie de l'environnement)
SIG	Systèmes d'information géographique
SQL	<i>Structured Query Language</i> (Langage d'interrogation du serveur)
UE	Union européenne
UN	<i>United Nations</i> (Nations Unies)
UNEP	<i>UN Environment Programme</i> (Programme des Nations Unies pour l'Environnement)
US	<i>United States of America</i> , code ISO2 pour les États-Unis
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> (Département de l'Agriculture des États-Unis)
WF	<i>Water flows</i> (flux d'eau). Utilisé dans ce rapport pour distinguer un des scénarios de l'étude de cas.
WWF	<i>World Wildlife Fund</i>

1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce rapport final présente les résultats du projet intitulé « Spatialisation des impacts en ACV », commandité par ScoreLCA et mené par le CIRAIG.

Les objectifs suivants ont été définis pour ce projet :

- Faire un état de l'art sur la prise en compte des aspects géographiques dans le calcul des impacts en ACV.
- Réaliser une étude de cas pour illustrer les enjeux et les pistes de solution de la prise en compte des aspects géographiques dans le calcul des impacts en ACV.
- Émettre des recommandations pour les praticiens ACV et les instances normatives sur les approches à utiliser.
- Diffuser les résultats de ces travaux auprès de différentes audiences.

Pour atteindre les objectifs fixés, le projet comprend deux modules et 4 tâches (Figure 1):

- Tâche 1. Évaluer l'état de l'art : Examiner les publications scientifiques récentes, les exigences réglementaires et normatives, les bases de données, les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) les plus récentes, ainsi que les logiciels ACV et d'autres outils pertinents (SIG).
- Tâche 2. Réaliser une étude de cas : Illustrer les enjeux et limites présentés dans le rapport, ainsi que les approches méthodologiques pour la mise en application de la prise en compte des aspects géographiques dans le calcul des impacts en ACV.
- Tâche 3. Formuler des recommandations : Proposer des recommandations pour le praticien ACV et les instances normatives, basées sur l'analyse critique et les leçons tirées de l'étude de cas.
- Tâche 4. Communiquer les résultats : Préparer un document de synthèse, organiser un webinaire, et créer un court module de formation autonome pour diffuser les résultats finaux du projet.

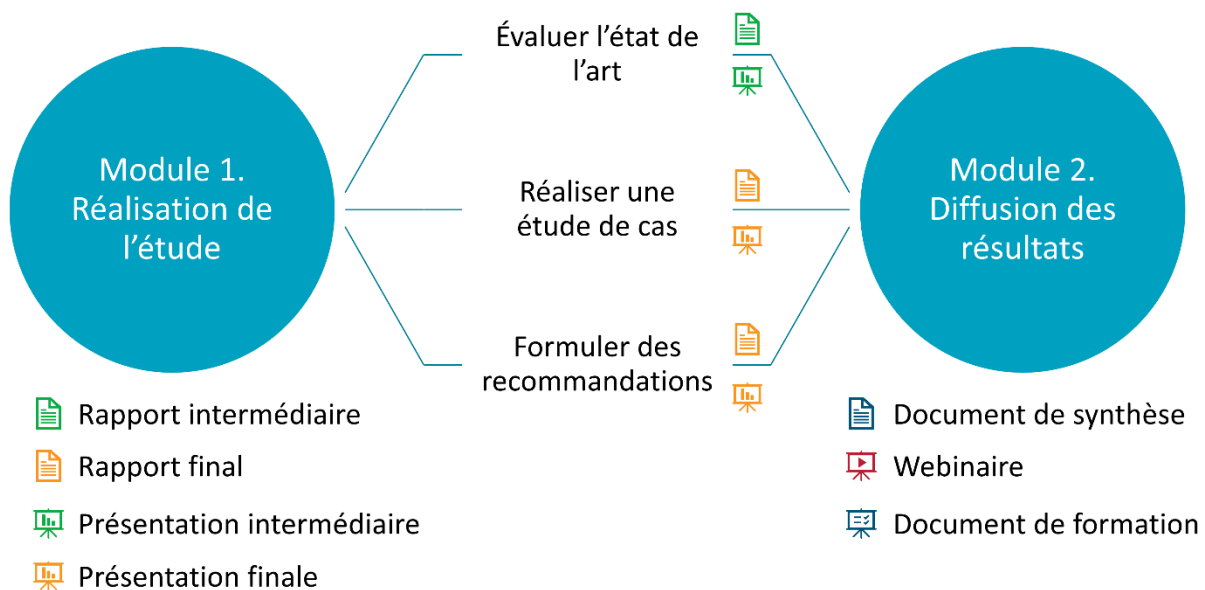


Figure 1. Les 2 modules du projet et leurs livrables associés

2. Introduction aux 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). À ces définitions, des ajouts sont faits dans ce rapport : des définitions de Mutel et al. (2019) permettant de clarifier des termes complémentaires (unité spatiale, résolution spatiale, etc.) et une définition de la spatialisation des impacts (telle que ce terme est employé dans cette étude). Les sous-sections suivantes précisent la terminologie utilisée dans cette étude.

2.1 Terminologie de base

Avant de plonger dans la suite de ce rapport, il est crucial de bien comprendre certains concepts fondamentaux relatifs à la spatialisation des impacts. Parmi ces concepts, on trouve l'**unité spatiale** (ou **région**), la **résolution spatiale** en lien avec l'**échelle**, ainsi que les notions de **régionalisation** et de **spatialisation**. Bien que ces derniers termes aient des significations distinctes, ils sont parfois confondus ou utilisés comme des synonymes, ce qui peut mener à des erreurs d'interprétation. Une compréhension claire de ces concepts est néanmoins essentielle pour garantir la rigueur et la pertinence des analyses réalisées.

Unité spatiale : Il s'agit de la définition géométrique d'une entité spatiale, telles que les coordonnées d'une cellule de raster¹ 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 ou un score d'impact (Patouillard et al., 2018).

2.2 Vue d'ensemble des concepts

Les concepts de **régionalisation** et de **spatialisation** sont appliqués à **différentes phases de l'ACV** et répondent alors à des objectifs distincts. D'un point de vue opérationnel, les tâches liées à la

¹ Un raster est formé par une matrice de cellules (ou pixels) disposées en lignes et colonnes (ou une grille), où chaque cellule contient une valeur représentant diverses informations, telles que la température. Ces rasters peuvent être des photographies aériennes numériques, des images satellites, des images numériques, voire des cartes numérisées (ArcGIS, 2024c).

régionalisation et à la spatialisation sont généralement prises en charge par diverses parties prenantes, notamment les praticiens ACV, les développeurs de méthodes d'ÉICV, les concepteurs de bases de données d'ICV ou ceux de logiciels ACV. Le Tableau 1 fournit une vue d'ensemble des concepts associés à la régionalisation et de la spatialisation à travers les différentes phases de l'ACV, et les sections suivantes détailleront ces éléments.

Tableau 1. Vue d'ensemble de l'application des concepts de régionalisation et spatialisation pour les phases d'ICV et d'ÉICV

Phase de l'ACV	ICV	ÉICV
Objets sur lesquels s'applique le terme	Modèle d'inventaire (processus) et inventaire du cycle de vie (flux élémentaires)	Modèle d'impact et facteurs de caractérisation (FC) (régionalisation) Scores d'impact (spatialisation)
Régionalisation = action d'améliorer la représentativité géographique de l'objet	Régionalisation de l'inventaire <ul style="list-style-type: none"> • Action: Augmenter la représentativité géographique du modèle d'inventaire • Résultat : Modèle d'inventaire régionalisé • Qui : Praticiens ou base de données ICV • Pourquoi régionaliser son inventaire? Réduire l'incertitude des scores d'impact reliée aux données d'entrée de l'inventaire (quantité et choix des processus/flux) 	Régionalisation des impacts <ul style="list-style-type: none"> • Action: Augmenter la représentativité géographique des modèles ÉICV en différenciant les valeurs des FC par régions ou par archétypes • Résultat : FC régionalisé • Qui : Développeur de méthodes ÉICV • Pourquoi utiliser des FC régionalisés? Réduire l'incertitude des scores d'impact reliée à la variabilité spatiale des FC
Spatialisation = action d'attribuer une localisation géographique à l'objet	Spatialisation de l'inventaire <ul style="list-style-type: none"> • Action : attribuer une localisation géographique aux flux élémentaires • Résultat : inventaire spatialisé • Qui : Praticiens ou logiciel ACV • Pourquoi spatialiser son inventaire? Pouvoir utiliser les FC régionalisés les plus pertinents 	Spatialisation des impacts <ul style="list-style-type: none"> • Action : attribuer une localisation géographique aux scores d'impact, en représentant la distribution spatiale des impacts • Résultat : Scores d'impact spatialisés • Qui : Logiciel ACV • Pourquoi spatialiser les impacts? 1) Apporter des informations additionnelles lors de l'interprétation pour supporter la prise de décision : analyse de contribution par régions causant ou subissant l'impact + 2) Réduire l'incertitude grâce aux FC régionalisés

2.2.1 Définition des concepts

Cette section présente les opérations de **régionalisation** et de **spatialisation** en distinguant leurs applications respectives à l'inventaire et à l'évaluation des impacts. Elle fournit non seulement les

définitions des concepts concernés, mais aussi une vue d'ensemble des résultats associés, des parties prenantes impliquées et des outils utilisés pour leur mise en œuvre.

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.

Il est important de noter que la régionalisation de l'inventaire est facultative pour la spatialisation des scores d'impact. Par conséquent, les techniques de régionalisation de l'inventaire ne sont pas détaillées dans cette étude, mais le lecteur peut se référer si nécessaire à l'étude de 2015.

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). La disponibilité des FC régionalisés est donc déterminée par ces développeurs. 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 a calculé des scores d'impact spatialisés en combinant un inventaire spatialisé avec des FC régionalisés.

2.2.2 Étapes de la spatialisation des impacts

À l'exception des catégories d'impact globales, la spatialisation des impacts, qu'elle concerne l'origine ou la destination, nécessite deux conditions fondamentales : un inventaire spatialisé et la disponibilité de FC régionalisés (Figure 2).

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 2.3.3). 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 2).

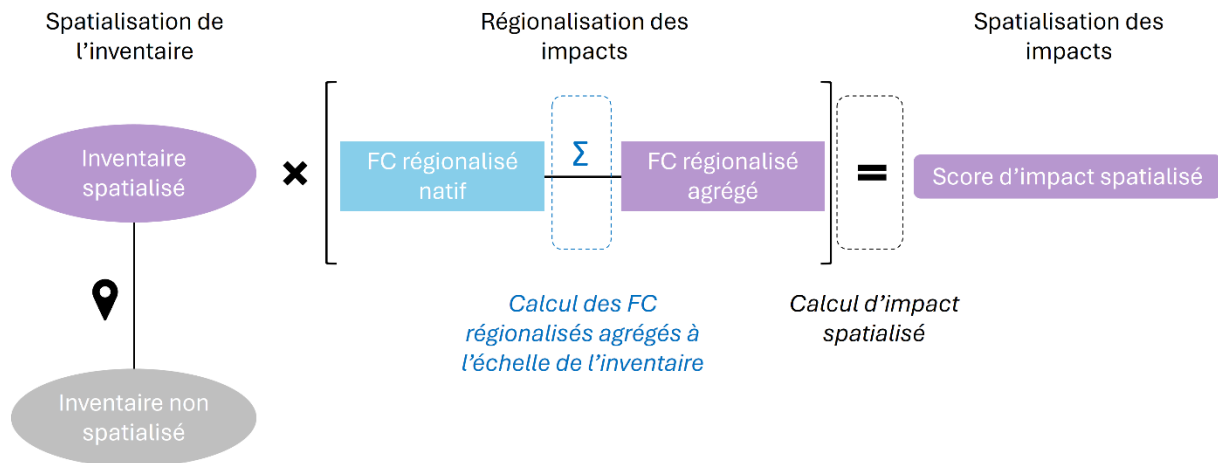


Figure 2. Étapes de la spatialisation des impacts, avec les couleurs indiquant les différentes échelles.

2.2.3 Principales motivations menant à la spatialisation des impacts

La spatialisation des impacts est un levier essentiel pour renforcer la précision et la fiabilité des résultats en prenant en compte la variabilité géographique des impacts environnementaux ainsi que la sensibilité de l'environnement ou des personnes. Deux objectifs majeurs motivent la mise en œuvre de la spatialisation des impacts : d'une part, la réduction des incertitudes et, d'autre part, la génération d'informations plus pertinentes pour la prise de décision (Patouillard et al., 2016).

1. **Réduction des incertitudes** : L'utilisation de données génériques ne permet pas de capturer de manière adéquate la variabilité géographique des processus (l'inventaire qu'y est associé) et des impacts. La spatialisation des impacts permet de pallier cette limitation en mobilisant des données spécifiques à chaque région, tant au niveau de l'inventaire que des FC, ce qui aboutit à des résultats plus précis et représentatifs. Cette réduction des incertitudes est primordiale pour garantir des processus décisionnels basés sur des évaluations environnementales solides et fiables.
2. **Renforcement de la prise de décision** : La spatialisation des impacts permet de localiser les régions génératrices ou réceptrices d'impacts environnementaux, offrant ainsi des informations plus contextualisées et pertinentes. De ce fait, elle peut aider les décideurs à concevoir des politiques et des actions mieux adaptées aux réalités environnementales spécifiques de chaque région.

2.3 Principales caractéristiques de la régionalisation des impacts

2.3.1 Différents types de régionalisation des impacts

Il existe deux principales approches pour la régionalisation des impacts (Figure 3): la **différentiation spatiale** (modèles multirégionaux ou imbriqués spécifiques à une région) et les **archétypes** (Mutel, et al., 2019; Patouillard, 2018).

1. Différentiation spatiale :

Cette approche consiste à développer des FC régionalisés en fonction de diverses échelles géographiques. Elle repose sur l'exploitation de données environnementales issues de disciplines telles que la climatologie, la géologie, l'hydrologie et la géographie humaine, afin de modéliser les impacts avec une plus grande précision en tenant compte de leur localisation spécifique.

Ce type de modèles offre généralement une couverture globale, avec des résolutions spatiales adaptées aux problématiques environnementales et à la disponibilité des données. Ils peuvent représenter de vastes zones géographiques, telles que des pays ou des continents, mais aussi des régions plus restreintes, comme les bassins versants ou les cellules de grille.

Le choix de la résolution spatiale repose souvent sur un compromis entre la rigueur scientifique et des contraintes pratiques, telles que la taille des ensembles de données et les capacités de calcul. Bien qu'une résolution plus fine soit souvent préférable pour obtenir une précision accrue, sa mise en œuvre peut être limitée par la disponibilité des données et la complexité des modèles.

2. Archétypes :

Les archétypes simplifient la modélisation spatiale en regroupant des scénarios ou des situations similaires qui permettent d'expliquer la variabilité des impacts sans nécessiter une résolution spatiale fine. Par exemple, les archétypes peuvent distinguer les émissions selon qu'elles surviennent en milieu urbain ou rural, une distinction souvent plus pertinente que l'emplacement géographique exact (par exemple, entre la France et l'Espagne).

Cette approche est particulièrement adaptée lorsque des données spatiales détaillées ne sont pas disponibles ou lorsque leur précision n'est pas essentielle. Les archétypes permettent de créer un lien efficace entre les données d'inventaire et l'ÉICV en se basant sur des critères clés, tels que la densité de population ou le type de source d'émissions (intérieur ou extérieur).

Cependant, l'utilisation d'archétypes exige une coordination étroite entre les différentes méthodes d'ÉICV afin de garantir la cohérence, notamment lorsqu'ils sont appliqués à différentes catégories d'impacts. Une approche hybride, combinant archétypes et données géographiques spécifiques, peut également être pertinente pour produire des analyses plus détaillées lorsqu'elles sont nécessaires.

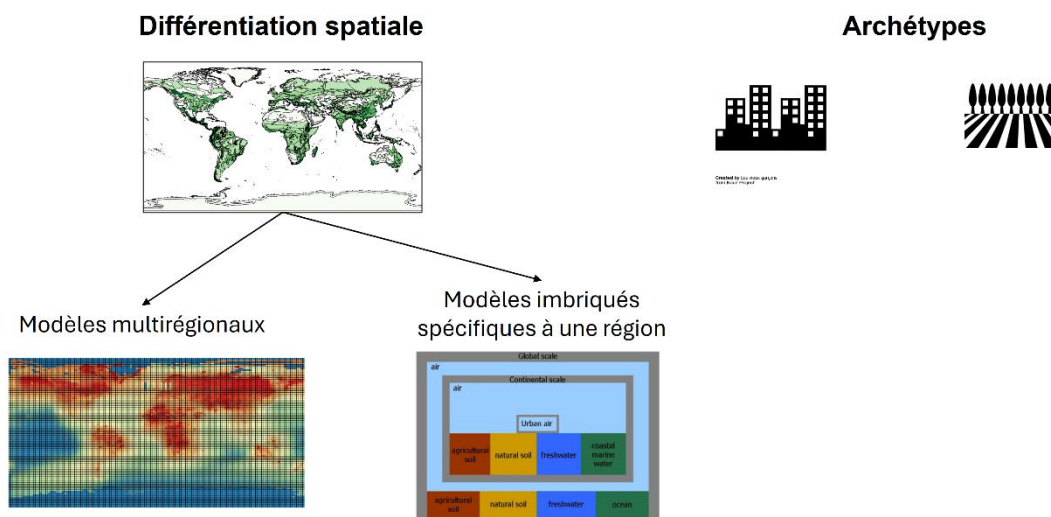


Figure 3. Types de régionalisation des impacts

2.3.2 Calcul de FC régionalisés natifs

Lors de la régionalisation des impacts, la différenciation spatiale est l'approche principalement utilisée dans le calcul des FC régionalisés.

La régionalisation des impacts intègre la variabilité en fonction du point d'émission du flux élémentaire, permettant ainsi de générer une carte de distribution du flux entre les différentes entités spatiales (cellules, pays, continents, etc.). La fraction du flux atteignant chaque entité spatiale est ensuite multipliée par la sensibilité du milieu récepteur afin de produire une carte des impacts associés à l'émission initiale. Pour une même catégorie d'impact, une carte est créée pour chaque lieu d'émission, avec un FC propre à chaque milieu récepteur (Figure 4).

Cela conduit au calcul d'un **FC régionalisé origine-destination**, qui conserve l'information à la fois sur l'origine de l'émission et sur les régions de destination, autrement dit, celles qui subissent l'impact. Cependant, les logiciels actuels ne sont pas en mesure de gérer simultanément l'origine et la destination des impacts. Par conséquent, les développeurs de méthodes d'ÉICV calculent des **FC régionalisés**

natifs, qui ne conservent que l'information sur l'origine de l'émission. Ces FC sont fournis à l'**échelle de résolution spatiale native**, déterminée par les développeurs de la méthode (Figure 4).

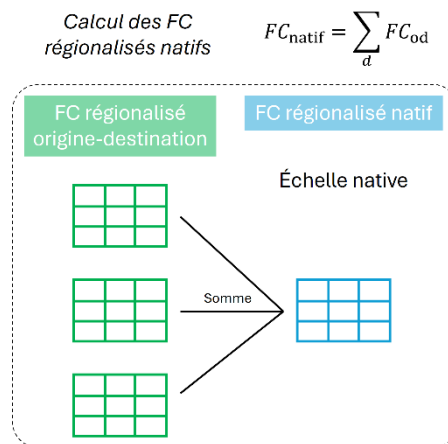


Figure 4. Régionalisation des impacts dans le cas des modèles multirégionaux pour le calcul de FC régionalisés « origine-destination » et « natifs ».

La **résolution spatiale native** correspond à la résolution spatiale des cartes des FC dans une méthode d'ÉICV, telle que choisie par ces développeurs. Elle représente, selon eux, la meilleure approximation de la variabilité spatiale des valeurs des FC (Mutel et al., 2019). À l'intérieur de chaque unité spatiale définie à cette échelle, les paramètres clés d'une catégorie d'impact donnée restent constants. Par exemple, la Figure 5 montre que la résolution spatiale native des FC dans la méthode AWARE est définie au niveau des bassins versants.

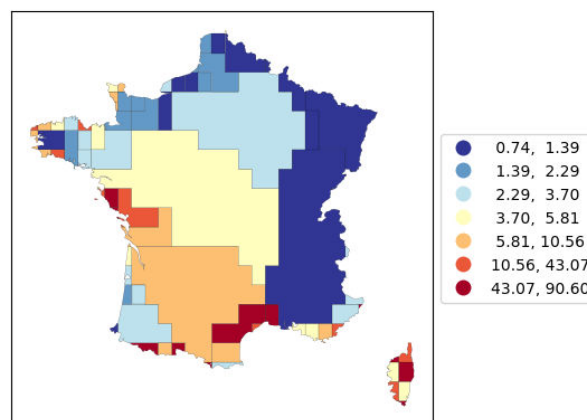


Figure 5. FC pour l'évaluation de la catégorie Water scarcity [m^3 world eq. / m^3 consommées dans la région i] dont l'échelle native est au niveau des bassins versants. Zoom sur la France Métropolitaine, basée sur Boulay et al. (2018).

2.3.3 Calcul de FC régionalisés agrégés

L'objectif principal du calcul des **FC régionalisés agrégés** est d'adapter leur utilisation à une échelle cohérente avec celle de l'inventaire. Le terme **résolution spatiale agrégée** désigne l'échelle cible à laquelle les FC régionalisés natifs sont regroupés.

La **résolution spatiale agrégée** est définie comme une transformation de la résolution spatiale native en une nouvelle échelle, généralement nationale, continentale, mondiale ou celle de l'inventaire (Mutel et al., 2019). Cette transformation permet d'intégrer les FC dans des modèles ACV à faible résolution spatiale tout en tenant compte de la variabilité spatiale des impacts.

Un **FC régionalisé agrégé** est obtenu par une moyenne pondérée des FC natifs, définis à une résolution plus fine (résolution native), pour les regrouper à une échelle d'agrégation plus large. La

pondération peut se baser sur différents critères, notamment la probabilité d'émission, la quantité de flux élémentaire dans la région native (ex: pour l'utilisation de terres), ou encore la consommation ou la surface. Pour chaque catégorie d'impact, le critère de pondération peut varier en fonction des paramètres inclus dans le modèle utilisé pour calculer les impacts. Lors de développement des méthodes ÉICV, les auteurs de ces méthodes recommandent souvent le critère le plus pertinent pour chaque catégorie.

La Figure 6 illustre le processus de calcul d'un FC régionalisé, passant de la résolution native à l'échelle nationale (France), en appliquant une moyenne pondérée par la probabilité de présence du flux élémentaire dans chaque région. Pour plus de détails, le calcul des FC agrégés pour la méthode IMPACT World+ sont présentés en Annexe 8.1.

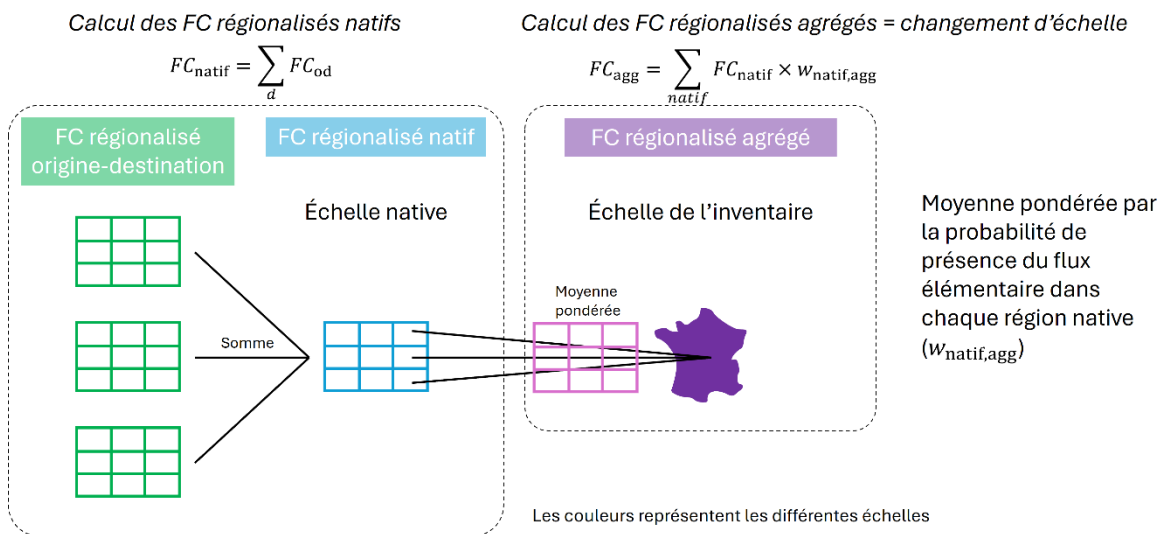


Figure 6. Calcul de FC régionalisés agrégés dans le cas des modèles multirégionaux

2.3.4 Étendues spatiales différentes selon les catégories d'impact

Les catégories d'impact peuvent être classées en fonction de l'étendue spatiale à laquelle les effets environnementaux se manifestent, qu'ils soient de nature **locale**, **régionale** ou **globale** (Figure 7). L'étendue spatiale de chaque catégorie reflète la distance entre la source d'émission et la zone de déposition, c'est-à-dire l'endroit où les effets sont observés. Cette classification permet une analyse précise des conséquences environnementales, en fonction de la portée géographique propre à chaque catégorie d'impact (Patouillard, 2018).

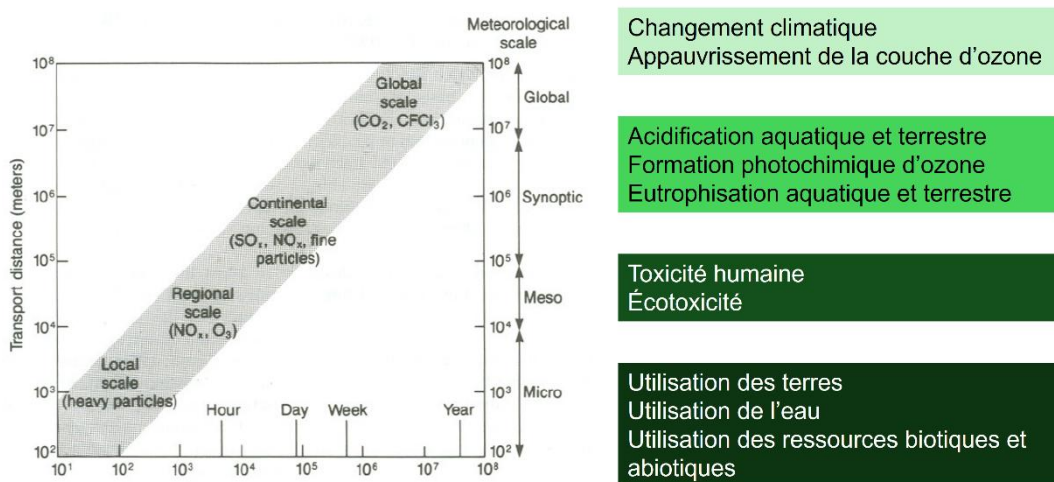


Figure 7. Étendue spatiale de la catégorie d'impact

Les **catégories d'impact à portée locale** se concentrent sur des zones géographiques restreintes, telles qu'une ville ou un bassin versants. Elles incluent des phénomènes environnementaux spécifiques, comme les émissions de particules fines qui altèrent la qualité de l'air au niveau local, ou encore la consommation d'eau dans un bassin versant donné, pouvant entraîner une raréfaction des ressources hydriques (Mutel et al., 2019; Patouillard, 2018).

Les **catégories d'impact de portée régionale** couvrent des territoires plus vastes, tels qu'un pays ou une grande région écologique. Elles permettent d'évaluer des phénomènes comme l'acidification ou l'eutrophisation des plans d'eau, et d'analyser comment des émissions locales peuvent avoir des répercussions plus étendues, affectant des zones géographiques voisines (Mutel et al., 2019; Patouillard, 2018).

Enfin, les **catégories d'impact à portée globale** concernent des phénomènes environnementaux qui dépassent les frontières locales et régionales, touchant l'ensemble de la planète. Ces catégories incluent notamment le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone, qui représentent des enjeux à l'échelle mondiale (Mutel et al., 2019; Patouillard, 2018).

La variabilité inhérente et les spécificités des impacts environnementaux sont mieux capturées à la plus fine échelle spatiale possible, c'est-à-dire la **résolution native**, adaptée à la nature des impacts et aux données disponibles. Ce niveau de détail vise à refléter le plus fidèlement possible la complexité des phénomènes environnementaux. Toutefois, dans certaines situations, l'agrégation des FC natifs vers une échelle plus large est nécessaire pour qu'ils soient alignés avec l'échelle spatiale de l'inventaire.

2.3.5 Spécificités de la régionalisation des catégories d'impact globaux et locaux

L'étendue spatiale des catégories d'impact joue un rôle déterminant dans la nécessité de spatialiser l'inventaire.

Pour les catégories d'impact présentant une étendue spatiale globale, la spatialisation de l'inventaire n'est pas indispensable. Toutefois, il peut être intéressant de connaître la différenciation spatiale des régions touchées par ces impacts. Dans cette optique, l'utilisation de **FC régionalisés destination** (définis dans la section 2.5.3) s'avère nécessaire. Cette approche permet d'analyser comment les impacts globaux se manifestent différemment selon les régions concernées, et ce sans avoir besoin d'une localisation précise des sources d'impact.

En revanche, pour les catégories d'impact à portée locale, les régions responsables de l'impact sont également celles qui en subissent les conséquences. Par conséquent, il est impératif que l'inventaire soit spatialisé pour ces catégories d'impact, afin d'utiliser ensuite les FC régionalisés les plus précis possibles.

Ainsi, comprendre l'étendue spatiale des catégories d'impact permet d'orienter les efforts de spatialisation de l'inventaire lors des itérations découlant de l'interprétation des scores d'impact. Ce dernier aspect est abordé à la section 2.5.3.

2.4 Principales caractéristiques de la spatialisation de l'inventaire

2.4.1 Nature de l'information géographique

Il existe deux approches principales pour la spatialisation de l'inventaire : le format textuel et l'utilisation des SIG.

La première approche consiste à spatialiser l'inventaire en format textuel, qui implique l'ajout d'indications sur la région d'origine des flux élémentaires, par exemple, en mentionnant le nom d'un pays. Dans cette approche, le nom du flux élémentaire intègre celui de la région, entraînant ainsi une multiplication des flux élémentaires uniques en fonction du nombre de régions définies dans la base de données d'ICV (Patouillard, 2018).

En revanche, l'approche par SIG permet d'incorporer des informations géographiques sous forme de coordonnées ou de vecteurs, grâce à l'implémentation d'algorithmes SIG présents dans certains logiciels ACV. Dans ce cas, il est seulement nécessaire de définir la région associée à un processus donné, et l'ensemble des flux élémentaires va hériter de la localisation du processus auquel ils appartiennent via l'algorithme SIG (Patouillard, 2018).

2.4.2 Méthodes de spatialisation

En lien avec les approches de spatialisation de l'inventaire (par nom du flux ou via SIG), deux méthodes principales peuvent être mises en œuvre.

D'abord, la spatialisation basée sur le nom du flux est généralement réalisée manuellement. Cette méthode requiert que le praticien ACV ou les concepteurs de bases de données sélectionnent le flux élémentaire correspondant à la région d'un processus donné. Toutefois, certains logiciels comme Brightway ont intégré des algorithmes permettant d'automatiser cette spatialisation, réduisant ainsi la nécessité d'une intervention manuelle des praticiens (voir section 3.5.2.1.3).

L'approche basée sur les SIG permet une automatisation complète de la spatialisation de l'inventaire. Dans ce cas, l'inventaire hérite automatiquement des informations géographiques en fonction de la région définie pour un processus donné, éliminant ainsi le besoin d'une intervention manuelle des praticiens pour la spatialisation de l'ensemble des flux élémentaires.

2.5 Principales caractéristiques de la spatialisation des impacts

2.5.1 Calcul d'impact spatialisé

Le calcul d'impact spatialisé est réalisé à l'aide de logiciels ACV. Deux principales méthodes de calcul d'impact spatialisé sont utilisées, selon l'approche disponible pour la spatialisation 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.
- **Spatialisation utilisant les SIG** : 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.

2.5.2 Opérationnalisation dans les logiciels

Les logiciels ACV adoptent l'une ou l'autre, voire les deux méthodes de calcul d'impact spatialisé présentées en section 2.5.1.

L'opérationnalisation la plus étendue de la spatialisation de l'inventaire et des impacts repose sur la méthode de spatialisation de l'inventaire basée sur le nom des flux élémentaires, où la localisation est indiquée sous forme de texte. Cette approche nécessite que les concepteurs de bases de données ou les praticiens ACV prennent en charge la spatialisation de l'inventaire. Elle suppose également que les FC régionalisés, agrégés à l'échelle de l'inventaire, soient déjà intégrés dans le logiciel ACV. Ainsi, le praticien doit soit utiliser les FC régionalisés disponibles, soit ajouter manuellement des flux élémentaires et des FC adaptés à la région d'un processus donné. Cette dernière opération entraîne une étape supplémentaire d'agrégation, qui doit être réalisée conformément aux recommandations des développeurs des méthodes d'ÉICV (section 2.3.3). Cette méthode est couramment utilisée dans le

logiciel SimaPro (Figure 8), comme détaillé à la section 3.5.2.1.1. Il est à noter que des bibliothèques complémentaires permettent également d'implémenter cette approche dans Brightway (section 3.5.2.1.3).

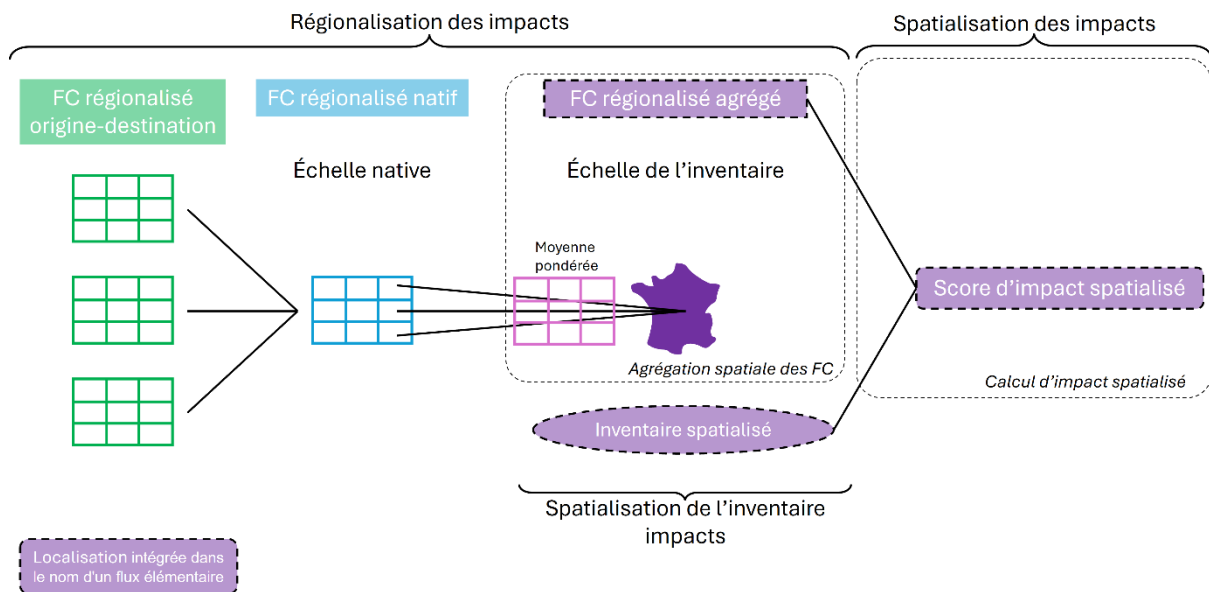


Figure 8. Opérationnalisation de la spatialisation de l'inventaire et des impacts dans SimaPro (générique)

D'autre part, l'opérationnalisation de la spatialisation basée sur les SIG permet une gestion intégrée de l'inventaire et des FC régionalisés. Dans cette méthode, l'algorithme SIG du logiciel effectue automatiquement la spatialisation de l'inventaire en fonction de la région associée au processus. Le logiciel peut également générer des FC régionalisés agrégés adaptés à cette région à partir de cartes de FC à leur échelle native, grâce à des algorithmes spécialisés. Cette méthode est principalement implémentée dans les logiciels openLCA (section 3.5.2.1.4) et Brightway (via la bibliothèque bw2-regional, section 3.5.2.1.3).

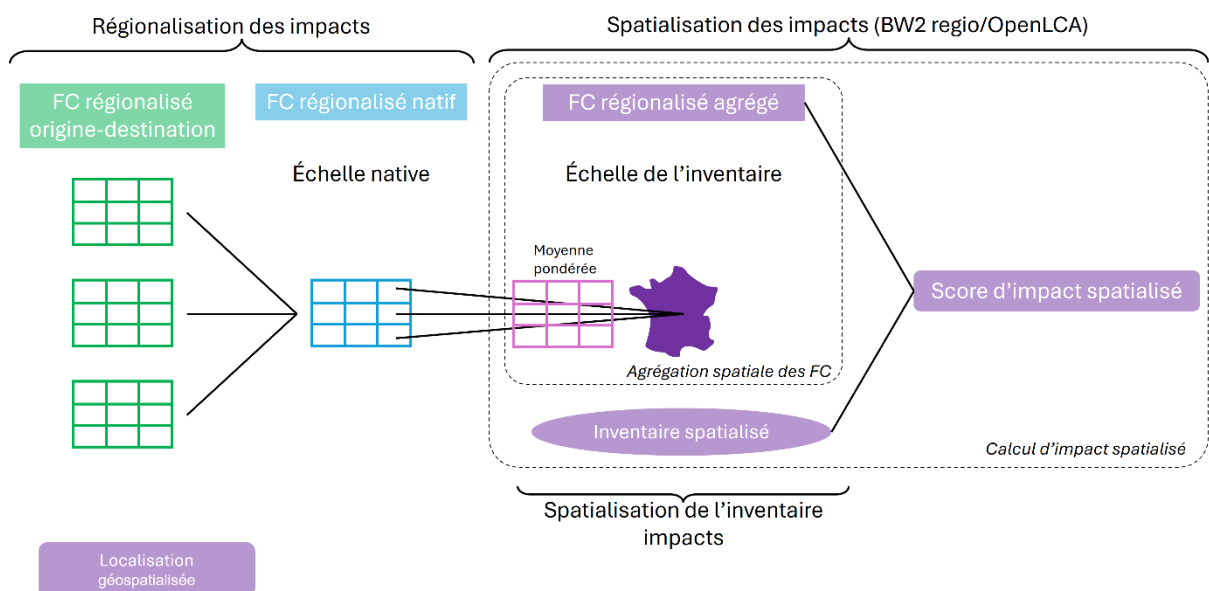




Figure 9. Opérationnalisation de la spatialisation de l'inventaire et des impacts par localisation géospatiale, notamment dans le cas de bw2-regional et openLCA.

2.5.3 Interprétation des scores d'impact spatialisé : « origine » versus « destination »

Le Tableau 2 présente les différentes interprétations possibles des scores d'impacts spatialisés, tenant compte de l'étendue spatiale des catégories d'impact, de l'échelle native des FC, ainsi que de la distinction entre la spatialisation des impacts dits d'« origine » et de « destination ». Dans ce rapport, le terme « origine » désigne les régions générant les impacts, tandis que « destination » fait référence aux régions subissant les effets de ces impacts.

- **Catégories d'impact à étendue spatiale locale** : Lorsque l'étendue spatiale de la catégorie d'impact est inférieure ou égale à la résolution native des FC régionalisés, les régions causant les impacts coïncident avec celles qui les subissent. Par exemple, pour une catégorie d'impact telle que la rareté de l'eau, l'inventaire peut être défini pour une région située à l'intérieur d'un bassin versant, ce qui correspond à l'échelle de résolution native utilisée pour cette catégorie d'impact.
- **Catégories d'impact à étendue spatiale régionale** : Lorsque l'étendue spatiale dépasse la résolution native des FC régionalisés, les régions qui subissent les impacts diffèrent de celles qui les génèrent. Ce type de spatialisation permet de refléter une répartition géographique plus large des impacts par rapport à la région à l'origine des impacts. Un exemple de ces catégories serait l'acidification terrestre, dont l'étendue spatiale est régionale mais les FC régionalisés sont calculés pour des cellules plus petites.
- **Catégories d'impact à étendue spatiale globale** : Pour les catégories d'impact globales, bien que la spatialisation des flux élémentaires ne soit pas toujours indispensable, il reste pertinent d'identifier les régions subissant les impacts pour une analyse complète. Dans ce cas, les régions d'origine des impacts ne coïncident pas nécessairement avec celles affectées, mettant en lumière la dissociation spatiale entre l'origine et la destination des impacts. Un exemple de cette catégorie est le changement climatique; dont l'étendue est globale, mais les impacts peuvent varier selon la région (ex: probabilité de sécheresse, inondations, etc.)

Tableau 2. Interprétation des scores d'impact spatialisés

Étendue spatiale de la catégorie d'impact	 Spatialisation des impacts « origine » = distribution des scores d'impacts en fonction de l'origine des impacts = régions <u>causant</u> les impacts	 Spatialisation des impacts « destination » = distribution des scores d'impact en fonction de la destination des impacts = régions <u>subissant</u> les impacts
Impacts locaux Étendue ≤ résolution native	origine (spatialisée) = destination (spatialisée)	
Impacts régionaux Étendue > résolution native	origine (spatialisée) ≠ destination (spatialisée)	
Impacts globaux Étendue = résolution native	origine (non spatialisée) ≠ destination (spatialisée)	

La distinction entre la spatialisation des impacts dits « origine » et « destination » nécessite l'utilisation de différents types de FC régionalisés. Afin de clarifier ces concepts, nous proposons une terminologie adaptée.

Pour les **catégories d'impact à étendue spatiale locale**, où les régions à l'origine des impacts coïncident avec celles qui les subissent, deux types de FC peuvent être employés : les **FC régionalisés natifs** et les **FC régionalisés agrégés**. Les FC régionalisés natifs se réfèrent à une région spécifique (ex : un bassin versant). Lorsque l'on peut associer ces FC à des flux élémentaires au même niveau, le besoin d'agrégation disparaît. En revanche, lorsque la région de l'inventaire recouvre plusieurs cellules des grilles de FC régionalisés (ex : un pays avec plusieurs bassins versants), une agrégation des FC est nécessaire pour les adapter à l'échelle de l'inventaire, donnant ainsi lieu à des FC régionalisés agrégés (section 2.3.3). Pour les impacts locaux, étant donné que les régions d'origine et de destination coïncident, aucune distinction dans les informations sur les régions de destination des impacts par les FC n'est requise.

Pour les **catégories d'impact à étendue spatiale régionale**, le calcul des impacts « origine » fait appel à l'utilisation de **FC régionalisés natifs ou agrégés**, selon l'intersection entre les régions de l'inventaire et celles des FC. En ce qui concerne les impacts « destination », des **FC régionalisés origine-destination** sont nécessaires. Ces FC intègrent des informations géographiques sur la région d'origine du flux élémentaire ainsi que sur les régions qui subissent l'impact. Un exemple de catégorie avec des FC régionalisés origine-destination serait l'acidification terrestre, où tant le lieu d'émission que la sensibilité du milieu récepteur sont considérés dans le calcul.

En ce qui concerne les **catégories d'impact à étendue spatiale globale**, le calcul des impacts « origine » peut être réalisé en utilisant des **FC non régionalisés**, car l'objectif se limite à identifier les régions à l'origine des impacts, sans l'identification des régions affectées. En revanche, pour les impacts « destination », l'utilisation de **FC régionalisés destination** est essentielle. Ces FC tiennent compte de la variabilité spatiale des impacts selon les régions affectées, sans nécessiter d'informations sur l'origine des flux élémentaires, ce qui explique l'absence du terme « origine » dans leur dénomination.

Le Tableau 3 présente les types de FC à utiliser en fonction de l'étendue spatiale des catégories d'impact.

Tableau 3. Type de FC à utiliser par type de spatialisation des impacts « origine » ou « destination »

Étendue spatiale de la catégorie d'impact	● →	→ ●
	Spatialisation des impacts « origine » = pour calculer la distribution des scores d'impacts en fonction de l'origine des impacts = régions <u>causant</u> les impacts	Spatialisation des impacts « destination » = pour calculer la distribution des scores d'impact en fonction de la destination des impacts = régions <u>subissant</u> les impacts
Impacts locaux Étendue ≤ résolution native → origine = destination	FC régionalisé natif FC régionalisé agrégé	FC régionalisé natif FC régionalisé agrégé
Impacts régionaux Étendue > résolution native → origine ≠ destination	FC régionalisé natif FC régionalisé agrégé	FC régionalisé origine-destination
Impacts globaux Étendue = résolution native → origine ≠ destination	FC non régionalisé	FC régionalisé destination

La Figure 10 illustre les étapes de la spatialisation des impacts et précise si celles-ci sont opérationnelles dans les logiciels ACV. Actuellement, les logiciels ACV ne permettent de calculer les scores d'impact spatialisés « origine » et « destination » que sous certaines conditions d'arrimage entre l'échelle de l'inventaire et l'étendue spatiale de la catégorie d'impact.

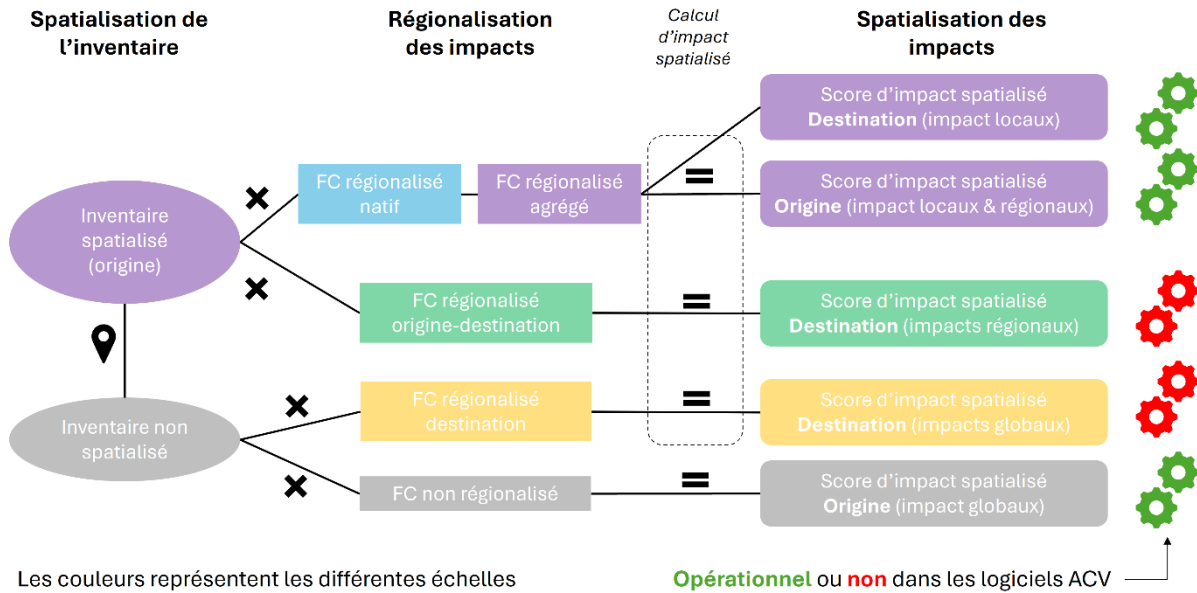


Figure 10. Étapes de la spatialisation des impacts.

Dans le cas de base, où l'inventaire n'est pas spatialisé, le calcul du score d'impact spatialisé « origine » demeure seulement possible pour des catégories d'impact globales, en utilisant des FC non régionalisés (en gris sur la Figure 10).

Pour les catégories d'impact dont l'étendue spatiale est locale, il est possible de calculer un score d'impact spatialisé « destination », à condition que l'inventaire soit spatialisé. De manière similaire, le calcul du score d'impact spatialisé « origine » est réalisable pour des catégories d'impacts locales et régionales. Ces trois scores d'impact spatialisés (en mauve sur la Figure 10) reposent sur le calcul matriciel standard des logiciels ACV, qui consiste à multiplier les flux élémentaires par leurs FC régionalisés correspondants.

En revanche, pour les catégories d'impact à étendue spatiale régionale ou globale, le calcul du score d'impact spatialisé « destination » (en vert et jaune sur la Figure 10) nécessite une adaptation du calcul d'impact spatialisé standard. Ce type de calcul implique l'utilisation de FC régionalisés origine-destination, car la précision apportée par l'origine permet d'associer les flux élémentaires aux FC correspondants, mais le FC doit aussi conserver des informations sur les régions qui subissent les impacts. À ce jour, ce type de calcul n'est encore implémenté dans aucun logiciel ACV, et il requiert en plus des algorithmes SIG pour pouvoir déterminer les scores d'impact totaux pour une catégorie d'impact donnée, en fonction des régions affectées.

En conclusion, dans ce projet, le concept de « **spatialisation des impacts** » implique l'**attribution d'une localisation géographique aux impacts, soit l'origine ou le lieu de destination**. Ce processus est réalisé en combinant la spatialisation de l'inventaire avec l'utilisation de **FC régionalisés natifs**, des **FC régionalisés agrégés**, des **FC régionalisés origine-destination** ou des **FC régionalisés destination** selon l'étendue spatiale de la catégorie d'impact considérée.

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.

En général, les mêmes enjeux apparaissent dans les deux publications. Cette section développe l'état de l'art dans le traitement de ces enjeux depuis le précédent rapport de 2015.

3.2 Définition des objectifs et du champ de l'étude

En règle générale, il est crucial d'harmoniser les choix relatifs au niveau de représentativité géographique des méthodes d'ÉICV et la qualité des données avec les objectifs et le champ de l'étude, ainsi qu'avec la couverture géographique envisagée (Patouillard et al., 2018). De plus, lors du 69^e forum sur l'ACV à Zurich, il a été noté que la définition d'une région dépend du contexte, du point de vue et de l'indicateur spécifique examiné. Ainsi, des systèmes de définition variés (politiques, économiques, topographiques et environnementales) peuvent être pertinents simultanément dans une même étude (Frischknecht et al., 2019). Par ailleurs, l'ILCD *Handbook Detailed Guidance* souligne qu'il est impossible de tirer des conclusions définitives sur un site spécifique en raison de l'agrégation spatiale des impacts. Par conséquent, considérer qu'une ACV régionalisée avec des impacts « destination » pourrait remplacer une analyse de risque menée sur un site donné serait une interprétation inappropriée (Figure 11). Il est pertinent de noter que la spatialisation des impacts « destination », qui implique la localisation précise des endroits où les interventions environnementales ont un impact, facilite

l'identification des régions les plus sensibles à ces effets pour un système de produit donné. Cependant, comme nous le décrivons dans les sections suivantes, cette approche reste peu développée en raison des limitations actuelles en termes d'opérationnalisation et de disponibilité de méthodes d'ÉICV intégrant à la fois des FC régionalisés origine-destination et des FC régionalisés (natifs, agrégés et destination).

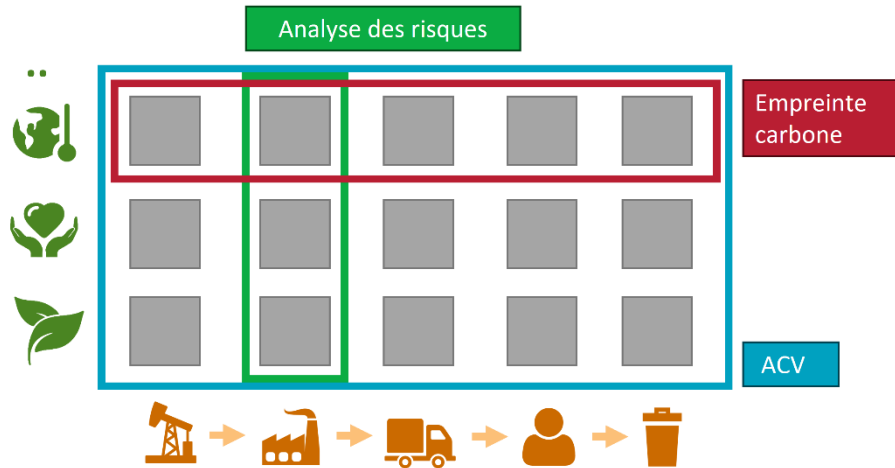


Figure 11. Une ACV régionalisée avec des impacts « destination » versus analyse de risque : étendu et enjeux environnementaux considérés.

De surcroît, les spécificités géographiques inhérentes à une étude peuvent restreindre la réutilisation des résultats dans un contexte géographique distinct. En effet, les choix concernant le niveau de représentativité géographique des données et des méthodes d'ÉICV doivent être alignés avec les objectifs et le champ de l'étude, ainsi qu'avec la portée géographique de celle-ci. Cette situation est mise en évidence lors d'une comparaison des impacts environnementaux potentiels des véhicules électriques et conventionnels dans le contexte d'utilisation québécois (Roy et al., 2016). Afin d'éviter toute extrapolation géographique des conclusions de l'étude, le rapport précise : « À la lumière des résultats de la présente analyse, il est possible de conclure, **en considérant le cycle de vie complet des deux types de véhicules étudiés, que le véhicule électrique représente un choix environnementalement préférable au véhicule conventionnel dans un contexte typique québécois, pour une distance parcourue de 150 000 km, à l'exception de la catégorie Épuisement des ressources minérales** » (Roy et al., 2016).

La Figure 12 met en lumière que l'utilisation des véhicules électriques engendre une contribution minimale aux impacts environnementaux potentiels tout au long de leur cycle de vie, principalement grâce à la faible intensité des émissions de gaz à effet de serre (GES) attribuée au mix énergétique québécois (Roy et al., 2016). Cependant, cette constatation ne saurait être généralisée à d'autres contextes géographiques. En effet, une simple comparaison des émissions de GES dans différentes régions, dues aux variations des bouquets électriques, révèle des écarts significatifs allant de 3 à 259 gCO₂éq/km. Il convient de noter que cette analyse ne prend pas en considération les variations de la consommation d'énergie, un autre facteur susceptible de varier selon le contexte géographique. Néanmoins, cette démonstration souligne l'incapacité à extrapoler les conclusions d'une étude ancrée dans un contexte géographique précis à d'autres régions.

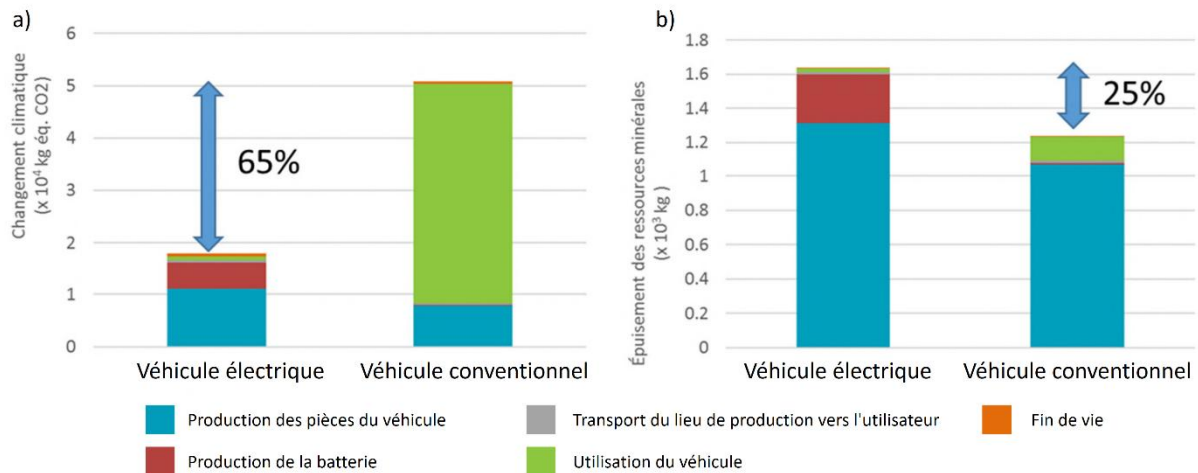


Figure 12. Analyse comparative entre les véhicules électriques et conventionnel après 150000 km. a) Changement climatique ($10^4 \text{ kg CO}_2\text{eq}$) et b) Épuisement des ressources minérales (10^3 kg). Adapté de Roy et al. (2016).

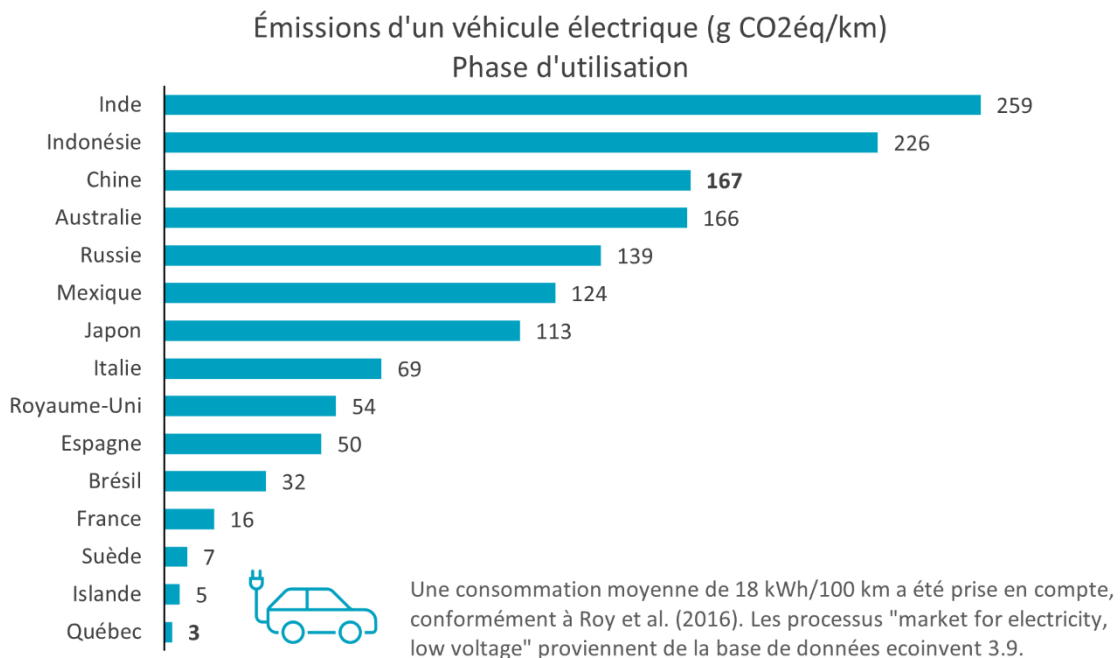


Figure 13. Émissions d'un véhicule électrique (g CO₂eq/km) lors de la phase d'utilisation.

3.3 Inventaires régionalisés

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.

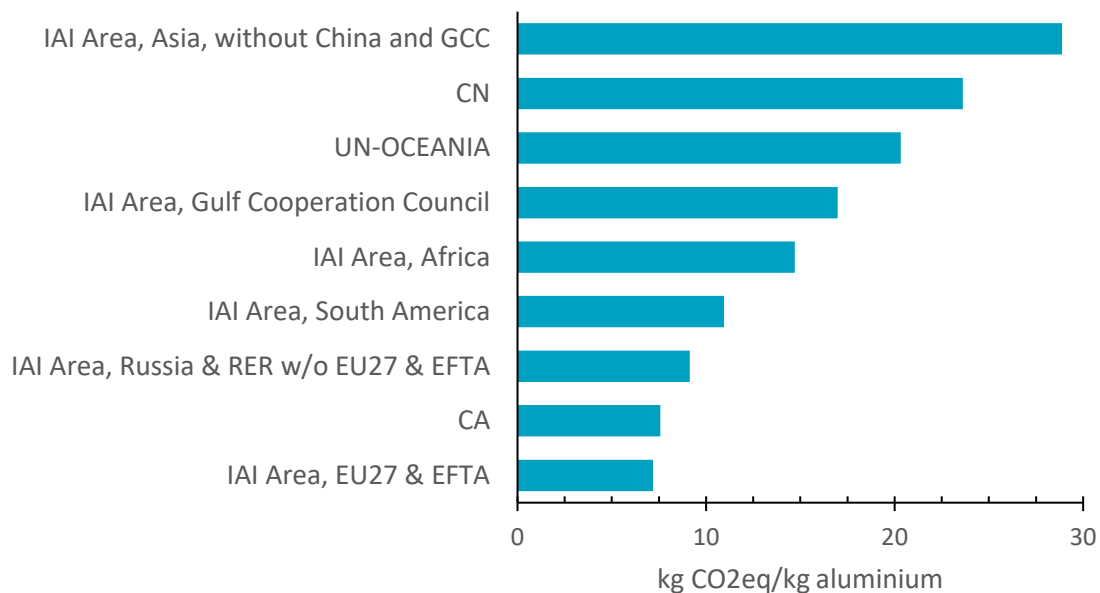
L'information géographique est associée au processus, ce qui affecte deux aspects :

- 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. En général, ces flux héritent l'information géographique du processus où ils se trouvent (par exemple, pour un processus en France, l'eau consommée devrait être considérée comme de l'eau prélevée en France), mais dans certains cas, les flux élémentaires sont spatialisés par archétypes. Alors que l'échelle d'agrégation par pays peut être utile pour relier des données d'inventaire aux FC, selon la catégorie d'impact, les archétypes peuvent constituer une approche utile pour l'agrégation. Par exemple, les archétypes d'émissions de particules fines fournissent des distinctions significatives pour les environnements intérieurs et extérieurs, urbains et ruraux, et constituent une approche capable de capturer la résolution nécessaire pour obtenir des estimations fiables des fractions prises pour ce type d'émissions. La fraction prise est définie comme le rapport entre la masse d'un polluant inhalé par une population exposée et la masse totale émise du polluant par une source donnée. Cette métrique est utilisée pour évaluer l'impact de la pollution atmosphérique et permet de tenir compte de la variabilité de l'exposition due à des facteurs tels que la densité de population et la météorologie locale (Frischknecht & Jolliet, 2017).

Régionalisation de l'inventaire

Cette information géographique permet de tenir compte des variabilités géographiques dans le calcul des résultats. L'absence de cette information fait en sorte que les résultats soient moins représentatifs de la réalité et peut induire à des conclusions erronées. La Figure 14 montre l'empreinte carbone de l'aluminium primaire produit dans différentes régions du monde. Les résultats varient d'un facteur quatre entre la pire région et celle avec le moins d'impact. Les différences proviennent majoritairement de la composition des *grid-mix* qui alimentent le processus d'électrolyse produisant l'aluminium. Comme dans l'exemple précédent du véhicule électrique, le fait de sélectionner une région plutôt qu'une autre peut influencer les conclusions tirées d'une comparaison entre des produits fabriqués à partir d'aluminium, comme montré dans la Figure 14.



Les processus "aluminium production, primary, ingot" proviennent de la base de données ecoinvent 3.9. Empreinte carbone calculée avec IMPACT World+ (Bulle et al. 2019)

Figure 14. Empreinte carbone de la production d'aluminium primaire selon des régions définies dans ecoinvent 3.9.

À ce jour, de nombreux processus dans des bases de données telles que ecoinvent sont régionalisés, ce qui simplifie la modélisation ICV sur le plan régional. La section 3.3.1 résume les principales bases de données avec leur traitement de l'information géographique.

Spatialisation des flux d'inventaire

Patouillard et al. (2015) distinguent trois principales approches pour spatialiser l'inventaire : d'abord, la définition d'un archétype pertinent, ensuite, l'inclusion d'informations géographiques sous format textuel, comme le nom d'un pays; et enfin, l'ajout de données géographiques sous forme de coordonnées ou de vecteurs. En outre, l'utilisation de Brightway pour créer des zones tampons spatiales probabilistes autour de la localisation des processus offre une approche supplémentaire pour affiner la spatialisation. Ces techniques permettent de mieux adapter l'inventaire aux spécificités géographiques et d'améliorer la précision des analyses.

Pour spatialiser les processus élémentaires, trois stratégies principales ont été détaillées (Patouillard et al., 2015):

- Exploiter la validité spatiale du processus obtenue lors de sa régionalisation antérieure.
- Recourir à des données statistiques relatives au processus, telles que les lieux de vente d'un produit.
- Utiliser des outils SIG pour recueillir des informations sur les lieux des interventions environnementales.

En plus des archétypes et des données purement géographiques (Patouillard et al., 2015), des « archétypes régionalisés » peuvent aussi être utilisés, lesquels correspondent à des archétypes applicables à des régions spécifiques, tels qu'une « zone urbaine en Europe » (Beltran et al., 2023). De même, Maesele et Roux (2021) utilisent des « pays représentatifs » comme archétypes pour évaluer l'efficacité environnementale de la réutilisation des eaux usées dans divers contextes climatiques, géographiques et réseaux électriques.

La régionalisation et la spatialisation de l'inventaire exigent des ressources considérables et un investissement en temps de la part des praticiens. Il arrive parfois que l'unité géographique requise ne soit pas définie dans les bases de données d'ICV (Loiseau et al., 2018). Cette lacune est particulièrement présente pour les pays en développement, où les données régionales pour l'ICV sont souvent rares (Morales et al., 2019). En conséquence, les praticiens ACV se trouvent souvent contraints d'utiliser des processus par défaut ou des données globales provenant des bases de données ICV existantes, qui peuvent être régionalisés en modifiant des éléments tels que les processus de marché, l'efficacité des processus et le mix électrique. Pour pallier ce problème, il est recommandé d'utiliser des données statistiques ou nationales publiquement disponibles afin de faciliter la régionalisation des inventaires (Morais et al., 2016).

Dans le domaine agricole, par exemple, des modèles d'émissions régionalisés ont été élaborés pour le phosphore afin de prendre en compte l'impact des conditions pédoclimatiques (Rydgård et al., 2024). Toutefois, il a été observé que la relation coût-bénéfice entre les efforts déployés et l'amélioration de la modélisation demeure peu claire (Henryson et al., 2020). Ainsi, une solution potentielle à ce problème consisterait à utiliser ou à développer des outils permettant l'intégration directe des résultats des calculs d'émissions provenant de l'application des intrants agricoles dans les logiciels d'ACV. Un exemple en est l'outil AGECLCI, qui facilite le calcul des émissions d'engrais, de pesticides et d'amendements du sol (Viveros Santos et al., 2020). Cependant, sa principale limitation est qu'il se concentre exclusivement sur la France.

3.3.1 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 4 résume le traitement spatial de différentes bases de données d'ICV.

Tableau 4. 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

3.3.1.1 ecoinvent

La base de données ecoinvent couvre plusieurs dizaines de régions géographiques, ce qui inclut des pays individuels, des subdivisions administratives (états, provinces), des régions spécifiques et des continents. Pour chaque région, l'inventaire est régionalisé, au minimum pour tenir compte du mix électrique de la région et de son volume de production. Chaque processus est lié à une géographie (*km²* ou *shapefile*³) de laquelle ses flux élémentaires directs (ceux qui ont lieu dans le processus *gate-to-gate*) héritent. Ceci permet donc de spatialiser certains flux élémentaires dans certains logiciels d'ACV (par exemple l'utilisation de l'eau et l'utilisation des terres dans SimaPro). Cependant, les résultats d'ÉICV précalculés par les développeurs de la base de données ecoinvent pour l'ensemble des processus (accessibles via l'outil *ecoQuery*) n'incluent pas des résultats régionalisés, même lorsque des indicateurs et méthodes avec des FC régionalisés sont disponibles.

La base de données ecoinvent tient compte de la géographie aussi lors du calcul de l'incertitude des flux de chaque processus. Comme exposé par Patouillard et al. (2015), la quantification de l'incertitude des flux se fait à l'aide de la matrice *pedigree*. La représentativité géographique est l'un des éléments évalués dans cette matrice. Cet aspect géographique est évalué selon les valeurs suivantes : 1) données de la zone étudiée; 2) données moyennes d'une zone plus vaste incluant la zone étudiée; 3) données d'une zone avec des conditions de production similaires; 4) données d'une zone avec des conditions de production légèrement similaires; et 5) données d'une zone inconnue ou nettement différente. Pour chaque flux économique et élémentaire, le niveau de corrélation géographique par rapport au descripteur géographique du processus est donc renseigné et traduit ensuite en incertitude.

Une caractéristique d'ecoinvent est la présence, pour la grande majorité de produits, de processus reste du monde (*Rest of the World, RoW*). Ces processus représentent une moyenne pondérée des diverses régions productrices d'un produit qui n'ont pas été régionalisées de manière spécifique et ne sont pas

² KML (anciennement connu sous le nom de *Keyhole Markup Language*) est un format de fichier basé sur XML permettant d'afficher des informations dans un contexte géographique (ArcGIS, 2024b).

³ Un fichier *shapefile* est un format simplifié et non topologique qui permet de stocker à la fois l'emplacement géométrique et les informations attributaires des caractéristiques géographiques. Ces caractéristiques peuvent être des points, des lignes ou des polygones (ArcGIS, 2024a).

régulièrement mises à jour. En fonction du produit, la composition du processus *RoW* varie, ce qui complique la prise en compte des caractéristiques géographiques lors de l'évaluation des impacts.

3.3.1.2 Managed LCA content (GaBi)

La base de données *Managed LCA content* développée par Sphera couvre également plusieurs dizaines de régions qui varient fortement en fonction des versions de la base de données. Bien qu'une localisation soit liée à chaque processus, la nature agrégée de la base de données ne permet pas que les flux élémentaires héritent facilement de la localisation du processus. Seuls les flux d'eau et d'utilisation de terres sont spatialisés dans la base de données.

3.3.1.3 USLCI, Agribalyse et Agri-footprint

Les bases de données USLCI, Agribalyse et Agri-footprint couvrent moins de régions qu'ecoinvent et Sphera pour deux raisons :

- Le caractère régional d'USLCI et Agribalyse, qui se concentrent sur la production dans leurs pays respectifs (États-Unis et France), bien que d'autres régions soient aussi représentées pour compléter le cycle de vie des produits, et;
- Le caractère sectoriel des deux bases de données agricoles (Agribalyse et Agri-footprint).

Dans les trois cas, les bases de données sont construites de façon similaire à ecoinvent; l'information géographique est attachée à chaque des processus et les processus *gate-to-gate* sont disponibles, donc l'information géographique peut être héritée par les flux élémentaires qui ont lieu à la même localisation.

3.3.2 Développements récents dans la régionalisation et spatialisation de l'inventaire (revue de littérature)

La littérature récente aborde les défis rencontrés dans l'acquisition de données et la régionalisation de l'inventaire.

3.3.2.1 Définition des flux d'inventaire

Afin de faciliter la collecte initiale de données appropriées, Heidari et al. (2021) suggèrent de classer les flux d'inventaire selon leur dépendance au site (*géographiquement dépendants*) et leur caractère générique spatial lors de la phase initiale de définition des besoins en données pour la réalisation de l'ACV. Pour leur part, Patouillard et al. (2016) ont conçu deux méthodologies itératives visant à rendre le travail de collecte de données moins considérable et plus ciblé, en donnant la priorité à la régionalisation des principaux contributeurs aux dommages ou à ceux dont la contribution à l'incertitude est significative.

3.3.2.2 Développement de données régionalisées (BDs régionales) et interopérabilité de données

Pour les pays en développement en particulier, les données ICV régionalisées sont encore rares (Morales et al., 2019), et les praticiens ACV se contentent souvent d'utiliser des processus par défaut issus des bases de données ICV, même si des statistiques ou des données nationales sont parfois publiquement disponibles pour permettre une régionalisation (Morais et al., 2016). Il convient de souligner que le fournisseur de la base de données ecoinvent propose un cadre contractuel permettant aux pays de collaborer à la création d'ICV régionalisés. Par exemple, ce cadre a été utilisé pour créer

des processus régionalisés pour le Québec (Lesage & Samson, 2016). De plus, il existe des bases de données ICV spécifiques à certains pays, comme celle pour la Chine (Ma et al., 2017), le Brésil (SICV Brasil, 2024), le Pérou (PERULCA, 2024), ou celles de l'ADEME pour la France (Agribalyse).

Les restrictions de licence empêchent parfois la publication de jeux de données de processus recontextualisés. Dans cette optique, Joyce et Björklund (2022) ont développé l'outil « Futura », permettant l'exportation des modifications apportées à une base de données sous forme de « recettes » respectant les contraintes de licence et pouvant être partagées entre chercheurs et praticiens ACV. Conçu à l'origine pour le partage de scénarios en ACV prospective, « Futura » utilise des algorithmes de régionalisation pour associer automatiquement les processus à des fournisseurs régionalisés appropriés en cas de modification de leur contexte régional. Kuczynski et al. (2016) discutent de la difficulté de combiner différentes bases de données ICV régionalisées en raison de leurs termes différents pour certaines unités géographiques et suggèrent le développement d'un « logiciel ACV sémantique » qui traite automatiquement ce problème. Les logiciels ACV sémantiques exploitent des technologies sémantiques, telles que la recherche, l'agrégation et les algorithmes de similarité textuelle, afin d'optimiser la recherche, l'intégration et l'interprétation des données en ACV. D'autre part, Bhat et al. (2021) proposent un cadre méthodologique pour le partage de processus ICV dans l'industrie du revêtement de chaussées, ces processus étant paramétrés et réutilisables par différents acteurs, facilitant ainsi la régionalisation sans nécessité de créer de nouveaux processus.

3.3.2.3 Développement de données régionalisées (adaptation « d'autres régions »)

En l'absence de données d'ICV régionalisées pour un pays ou une région donnée, plusieurs approches peuvent être envisagées pour estimer les données régionales. Par exemple, Dai et al. (2020) structurent les efforts de régionalisation ICV en trois stratégies. D'abord, en partant de l'utilisation de données déjà disponibles. Par exemple, le Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA) publie des données au niveau de l'état concernant l'utilisation de produits agrochimiques dans les états qui sont des leaders dans la production agricole. Deuxièmement, par ajustement ou extrapolation des données à partir de données pour d'autres régions ou échelles, en appliquant des hypothèses raisonnables. La troisième stratégie consiste à créer de modèles paramétrés reproduisant les caractéristiques spécifiques des régions étudiées, en utilisant des données adéquates. Par exemple, la troisième stratégie correspond à l'utilisation des modèles pour calculer des émissions des pesticides tenant compte des caractéristiques spécifiques du contexte géographique du processus agricole, comme le modèle pestLCI (Renaud-Gentié et al., 2015).

Diverses approches ont été appliquées dans différentes études et contextes pour développer des données régionalisées. Liao (2022) propose une régionalisation des processus agricoles en créant des archétypes de processus pour différentes pratiques agricoles et les combine dans des proportions variables pour simuler l'ICV de certaines cultures à l'échelle nationale. Dans leur étude sur les centrales solaires thermiques, Lorenz et al. (2017) optent pour les processus « géographiquement les plus proches », comme utiliser le diesel américain pour modéliser le diesel chilien. Meron et al. (2020) présentent une méthode statistique pour choisir des ensembles de données ICV adaptés à des sites spécifiques. Cette méthode repose sur l'utilisation des *proxies* disponibles dans les bases de données ICV, en se basant sur la similarité de leurs caractéristiques avec celles de l'ICV ciblé. Enfin, les auteurs soulignent que l'efficacité de cette méthode dépend de la qualité et de la pertinence des caractéristiques sélectionnées dans les bases de données d'ICV (Meron et al., 2020).

Des *proxies* sont également utilisées pour estimer des paramètres individuels d'un processus. Par exemple, pour affiner la résolution à partir d'échelles plus larges, Heidari et al. (2017) utilisent les rendements agricoles comme proxy pour répartir les volumes de récolte. Benoist et al. (2024) élargissent leur ensemble de données ICV concernant l'utilisation du bois de chauffage au Burkina Faso en se basant sur des données mesurées représentatives des pays voisins. Morais et al. (2017)

recommandent de commencer par l'acquisition de données à une échelle fine, ne recourant à des échelles plus larges que si aucune donnée fine n'est disponible. Lors de la combinaison d'échelles géographiques différentes, il est essentiel de garantir la cohérence d'échelle. Cela implique que l'addition des inventaires de processus régionaux doit être égale à l'inventaire de l'échelle géographique suivante (le total des émissions de sous-régions doit être égal à l'émission totale de la région complète), comme les statistiques nationales sur les émissions de gaz à effet de serre.

En outre, certains chercheurs ont pour objectif spécifique d'accroître le nombre des ICV régionalisés. Particulièrement, Leão et al. (2018) soulignent le manque de régionalisation des ICV d'approvisionnement en eau dans les bases de données, incluant notamment les technologies de purification utilisées et la source d'eau. Ils ont ainsi constitué un jeu de données mondial de mélanges d'approvisionnement régionalisés pour 93 pays, à différentes résolutions. Jordaan et al. (2018) notent que les données de consommation d'eau spécifiques à l'industrie, nécessaires à la création des ICV, manquent souvent de détails géographiques. Ils proposent une stratégie pour élaborer des inventaires de consommation d'eau régionalisés pour certains secteurs de production d'énergie, utilisables par d'autres chercheurs. Par ailleurs, Cardellini et al. (2018) ont développé une base de données ICV forestière, tandis que Donke et al. (2020) ont intégré des données sur les changements d'utilisation des terres dans les processus ecoinvent brésiliens. Des modèles d'émissions régionalisés, comme ceux élaborés par Rydgård et al. (2024) pour le phosphore, sont également pertinents pour la régionalisation de l'inventaire. Cependant, Henryson et al. (2020) soulignent les défis liés au choix des modèles d'émissions, car le rapport entre l'effort investi et les bénéfices obtenus reste flou.

Peng et Pfister (2024) ont développé une approche de régionalisation visant à améliorer la précision de la base de données d'ICV ecoinvent, qui présente des lacunes en termes de données détaillées au niveau national et d'informations précises sur le commerce. Cette méthode repose sur la décomposition des processus globaux et continentaux d'ecoinvent au niveau des pays, associée à l'intégration de modèles de consommation spécifiques à chaque pays, fournis par EXIOBASE, pour régionaliser les données commerciales. Grâce à cette approche, les données régionalisées d'ecoinvent ont révélé des variations significatives dans les impacts sur le changement climatique et la consommation d'eau entre les différents pays, des différences qui étaient masquées dans les données agrégées.

Dans cette optique, Agez (2024) a développé le modèle Regioinvent, intégré dans une librairie Python avancée, spécialement conçue pour la régionalisation de la base de données ecoinvent à l'aide de données commerciales. Regioinvent se distingue par sa capacité à adapter les processus ecoinvent aux spécificités régionales en intégrant des données commerciales et de consommation provenant de sources variées. Ce modèle permet la modification des entrées clés, telles que l'électricité, la chaleur et les déchets solides municipaux, pour refléter les conditions particulières des pays ciblés. Il spatialise également les flux élémentaires, tels que l'eau, les terres et ceux reliés aux impacts d'acidification et d'eutrophisation. Regioinvent s'appuie sur les données d'exportation de la base UN COMTRADE pour déterminer la nécessité de créer des versions régionalisées des processus. Il utilise également les données d'importation de cette même source, ainsi que les niveaux de production domestique dérivés de la base EXIOBASE GMRIO, pour établir et intégrer des marchés de consommation, permettant ainsi une adaptation régionale approfondie.

3.3.2.4 Création de nouvelles données à l'aide d'outils hors ACV

Dans le cas de la modélisation des ICV à partir de zéro, par exemple pour les processus d'avant-plan, des systèmes d'information géographique (SIG) et des modèles mathématiques sont souvent mobilisés pour créer des inventaires régionalisés. Par exemple, Loiseau et al. (2020) ont modélisé les chaînes d'approvisionnement alimentaire de différentes tailles en utilisant une librairie SIG sur Python pour calculer les itinéraires de transport à partir des emplacements des statistiques nationales, pondérés par les surfaces de production, afin d'obtenir une distance de transport moyenne nationale. De même,

Accorsi et al. (2022) ont utilisé un jumeau numérique (*digital twin*)⁴ de chaîne d'approvisionnement pour modéliser les distances de transport et la consommation de carburant dans leur étude sur les réseaux de contenants alimentaires recyclables. Quant à McAuliffe et al. (2022), ils ont modélisé les ICV de l'élevage bovin à l'aide d'un modèle agricole dont l'échelle spatiale est au niveau des bassins versants. Le choix du modèle et de la résolution spatiale a été guidé par l'objectif de l'étude, qui était d'évaluer la qualité de l'eau en tenant compte des interventions visant à réduire les potentiels d'acidification et d'eutrophisation dans les exploitations agricoles et d'élevage du sud-est de l'Angleterre.

Particulièrement pour les inventaires complexes, la revue de littérature révèle une tendance à recourir à des modèles informatiques externes intégrant des aspects d'ACV et de SIG, plutôt que d'incorporer des modèles complexes directement dans les logiciels d'ACV :

- Micolier et al. (2019) explorent l'utilisation de la simulation multi-agents (ABM, *agent-based modelling*) conjointement avec les SIG pour affiner la représentation du comportement humain à l'échelle régionale, en particulier pour évaluer l'impact de la pollution causée par les déchets. Dans une autre approche, l'ABM est adopté par Raghu et al. (2020) pour modéliser l'ACV des chaînes d'approvisionnement. Les SIG ont été utilisés pour cartographier et analyser la disponibilité de la biomasse, les points de fourniture, ainsi que le réseau routier autour de la zone opérationnelle de la chaîne d'approvisionnement. En intégrant la modélisation ABM aux SIG, l'étude a pu prendre en compte à la fois la répartition spatiale des ressources et les dynamiques temporelles de la chaîne d'approvisionnement. Cette approche a permis de réaliser une évaluation plus complète et adaptée aux conditions locales des impacts environnementaux.
- Aljohani et Alzahrani (2019) utilisent GREET, un modèle de cycle de vie complet pour le secteur des transports aux États-Unis. Avec un inventaire intégralement régionalisé, le modèle génère des résultats d'ACV en interne, mais uniquement pour certaines catégories, telles que les GES et l'énergie).
- Messmann et al. (2023) développent un modèle pour la conception stratégique des réseaux visant à identifier les meilleures solutions environnementales et sociales dans la production de bioéthanol en Europe. Le modèle identifie les zones sensibles sur le plan social en utilisant des données géographiques, telles que les régions où se manifestent des problèmes significatifs comme les blessures et les décès. Cette approche ciblée permet une optimisation précise qui prend en compte les impacts sociaux spécifiques à chaque région. De plus, le modèle intègre à la fois des catégories d'impact environnemental, en s'appuyant sur la méthode d'ÉICV ReCiPe 2016.

Les logiciels existants présentent souvent des limites en termes de traçabilité des flux tout au long de la chaîne d'approvisionnement, en particulier en ce qui concerne la précision sur le l'origine de production et le lieu de consommation. Liao (2022) tente de combler cette lacune en proposant un modèle simplifié utilisant les données commerciales de FAOSTAT. D'autre part, Lathuillière et al. (2021) avancent la méthode CSM (*commodity supply mix*), qui intègre des données commerciales (par exemple, de comtrade.un.org), dans le processus de régionalisation de l'ICV. Ils soulignent que cette approche pourrait s'avérer appropriée lorsque des données détaillées sur l'approvisionnement en produits ne sont pas disponibles pour le praticien. De plus, cette méthode pourrait être particulièrement pertinente à l'échelle sous-nationale, notamment pour évaluer l'approvisionnement en produits agricoles provenant de différentes régions. Afin de guider les efforts de régionalisation, la méthode CSM pourrait être utilisée pour déterminer si la variabilité spatiale est significative pour un approvisionnement spécifique en produits dans une région ou un pays donné.

⁴ Un jumeau numérique est une représentation virtuelle dynamique d'un objet ou d'un système physique, généralement à plusieurs étapes de son cycle de vie. Il utilise des données du monde réel, des modèles de simulation ou d'apprentissage automatique, combinés à l'analyse de données, pour permettre la compréhension, l'apprentissage et le raisonnement. Les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour répondre à des questions hypothétiques et devraient être en mesure de présenter les résultats de manière intuitive.

Source : <https://developer.ibm.com/articles/what-are-digital-twins/>

Dans une étude portant sur les chaînes d'approvisionnement des pommes françaises, Loiseau et al. (2020) ont observé que la distance entre le consommateur et le détaillant constituait un facteur d'incertitude majeur dans leur ACV. Afin de tenir compte de l'incertitude liée à la localisation de ces acteurs en France, ils ont développé un outil permettant de varier les paramètres de ce déplacement et d'évaluer ainsi les résultats de l'ACV de manière appropriée. Ce genre d'outil pourrait être utilisé pour l'amélioration des données régionales.

De plus, quelques études ont utilisé de bases de données étendues d'entrées/sorties (ES) en combinaison avec l'ACV (ACV hybride). Alors que l'ACV se distingue par sa granularité et sa capacité à être adaptée à des contextes spécifiques, un tableau d'entrées-sorties (ES) se déploie sur des territoires plus vastes, recourant à des unités monétaires et adoptant une approche moins spécifique aux technologies. La fusion de ces deux approches au sein de cadres de calcul de matrices automatisés permet de cartographier de manière exhaustive les flux de matières et d'énergie à différentes échelles spatiales, tout en préservant une représentation détaillée des technologies propres à certains secteurs (K. Lee et al., 2023; R. Li et al., 2019). Néanmoins, ces approches peuvent être confrontées à des défis tels que les chevauchements et les doubles comptages entre les ensembles de données ES provenant de résolutions géographiques différentes (K. Lee et al., 2023). Dans le cas des ACV étudiant des produits dans un contexte élargi du commerce et des flux interrégionaux, la régionalisation multiniveau peut se révéler pertinente. Par exemple, Milovanoff et al. (2021) intègrent des données commerciales déterminantes pour l'aluminium dans une analyse multilatérale des flux de matières, conjointement avec une ACV, afin d'évaluer les impacts environnementaux de la production primaire de ce matériau.

3.3.2.5 Applications avec inventaires régionalisés

L'ACV territoriale et l'ACV prospective représentent des cas où la dimension géographique s'avère cruciale. En particulier, l'ACV territoriale est une application qui exige un ICV très régionalisée. Dans cette approche, des modèles intègrent des données sur les échanges internes et externes de territoires entiers. Souvent, ces modèles incluent des aspects géoréférencés qui permettent d'incorporer les particularités locales dans la modélisation de l'ACV (Loiseau et al., 2018). Cependant, Ding et al. (2020) ont mis en évidence le déficit de processus au niveau sous-national dans les bases de données d'ICV, nécessaires pour une ACV territoriale. Ainsi, l'étude s'est appuyée sur les statistiques d'Eurostat concernant les rendements agricoles locaux, complétées par des facteurs d'émission liés au rendement et à la teneur en nutriments. Dans un travail ultérieur, Ding et al. (2023) ont extrait les données d'ICV des cultures à partir de la base de données ecoinvent, en utilisant la librairie Brightway. Les processus ont été ensuite classés en processus internes et externes au territoire.

Un autre exemple d'ACV avec un inventaire régionalisé est présenté dans les études d'optimisation, où les résultats de l'ACV sont utilisés itérativement pour affiner l'inventaire régionalisée, dans le but d'améliorer les performances environnementales (Almeida et al., 2016). Cette approche est fréquemment observée dans le domaine de la bioénergie. Les résultats de l'ACV sont intégrés dans un processus d'optimisation afin d'ajuster les paramètres régionaux de l'inventaire et d'identifier les configurations les plus efficaces en termes d'impact environnemental. Cette méthode garantit que les décisions d'optimisation reposent sur des données régionales précises, favorisant ainsi une amélioration continue des performances environnementales tout au long du cycle de vie des produits.

De surcroît, la revue de littérature montre que l'ICV régionalisée peut être combinée avec des bases de données sur les échanges commerciaux. Selon Liao (2022), l'ACV des portefeuilles de produits des entreprises, notamment dans le secteur alimentaire, requiert des modèles d'ACV régionalisés plus sophistiqués en raison de la complexité des facteurs et des chaînes d'approvisionnement impliquées.

Dans le cas de l'ACV prospective, les modèles d'évaluation intégrée (IAM) sont couramment déployés pour anticiper l'inventaire régionalisé dans le futur. Cependant, la résolution spatiale de ces IAM est souvent limitée. Afin de garantir une régionalisation adéquate, une collaboration concertée des

communautés de modélisation serait nécessaire. Cela impliquerait d'améliorer la résolution des sorties des modèles en se fondant sur des hypothèses communément acceptées et documentées (Joyce & Björklund, 2022).

Lathuillière et al. (2021) examinent les modèles commerciaux des pays et concluent que même pour les importations de certains produits par pays, la régionalisation serait appropriée, car les pays n'importent souvent pas les produits des mêmes origines dans les mêmes proportions que les bases de données ICV le suggèrent. Cette constatation est corroborée par Liao (2022) dans une étude sur l'huile de palme consommée en Suisse. De plus, la variabilité spatiale peut être significative même à petite échelle. Par exemple, Heidari et al. (2017) notent que les différences de rendement entre différentes exploitations agricoles peuvent entraîner des variations importantes dans les résultats de l'ACV. C'est pourquoi les ACV basées sur l'exploitation agricole devraient privilégier l'utilisation de données primaires plutôt que des données par défaut des bases de données d'ICV (Frischknecht et al., 2019). Henriksen et al. (2018) soulignent également que la gestion des déchets organiques, tels que les déchets alimentaires et les déchets de jardin, peut varier considérablement en fonction du site.

3.3.2.6 Nouveaux outils pour le développement de données régionalisées

Lee et al. (2020) adoptent une approche d'apprentissage automatique (*machine learning*) pour réaliser une ACV prospective régionalisée. En se basant sur les données d'ICV disponibles et les paramètres environnementaux associés tels que la température, leur modèle d'apprentissage automatique projette les impacts en fonction des changements climatiques attendus. De même, Li et al. (2023) suggèrent l'utilisation de techniques d'exploration de données (*data mining*) pour évaluer une ACV avec des « indicateurs multiniveaux », c'est-à-dire l'agrégation d'un large éventail d'indicateurs pouvant être régionaux.

Enfin, différents langages de programmation sont utilisés dans la littérature pour exploiter des fonctionnalités de modélisation spécifiques afin d'améliorer la représentativité géographique des données d'inventaire. Les langages de programmation couramment utilisés pour modéliser l'ACV régionalisée à l'extérieur de logiciels ACV commerciaux sont Python et MATLAB. Ces langages permettent d'exploiter diverses bibliothèques et services pour des tâches spécifiques, telles que le calcul automatique des distances de transport pour un produit dans une région donnée. Par exemple, ils facilitent la régionalisation des processus de marché d'une base de données (Ding et al., 2023; Loiseau et al., 2020). Jouannais et al. (2022) modélisent leurs processus en Python et les intègrent à Brightway, leur permettant ainsi de réaliser une simulation stochastique de leur inventaire et de comparer les distributions de probabilité résultantes pour deux emplacements de processus différents. De manière similaire, Beltran et al. (2023) calculent les résultats de l'ICV pour un grand nombre de parcelles agricoles directement en Python, en utilisant des données d'entrée et de sortie précalculées issues de Brightway. D'autre part, Frost (2021) utilise des services de géocodage via GoogleMaps et ArcGIS pour associer des adresses à des coordonnées géographiques, bien que cela nécessite une supervision humaine. Bi et al. (2019) importent des données ICV dans MATLAB et utilisent un algorithme génétique pour optimiser le déploiement de la recharge sans fil pour les véhicules électriques en fonction des émissions de GES. Heeren et Hellweg (2019) stockent des données de bâtiment dans une base de données SQL géospatiale, les lient à ecoinvent et enregistrent les résultats d'impact, facilitant l'accès aux résultats pour de nombreux bâtiments sur différentes échelles spatiales. Pour leur part, Ding et Achten (2022) adoptent une approche de simulation multi-agents, où les exploitations sont placées dans des cellules de grille et leur inventaire est associé à ces cellules respectives. De même, l'utilisation de MATLAB permet la mise en œuvre d'un inventaire résolu dans l'espace et dans le temps (M. Maier et al., 2017; Megange et al., 2020). Finalement, dans leur revue sur le couplage des mégadonnées et de l'ACV, Li et al. (2023) suggèrent l'intégration des données de l'Internet des objets dans l'inventaire pour améliorer la régionalisation, soulignant également le potentiel des approches d'apprentissage automatique.

Spatialisation

Il arrive parfois que tous les flux élémentaires ne soient pas spatialisés dans une ACV. Par exemple, Beltran et al. (2023) soutiennent que l'eutrophisation est l'un des effets les plus significatifs de l'agriculture, et ils régionalisent donc les FC d'eutrophisation à une résolution spécifique à leur étude. D'autre part, Cabot et al. (2023) utilisent les FC régionalisés natifs d'IMPACT World+ à partir de fichiers KML, et sélectionnent les catégories d'impact importantes en fonction de leur pertinence dans l'agriculture.

De la même manière que pour le développement des ICV régionalisés, plusieurs études décrivant leur processus de spatialisation de l'inventaire utilisent des langages de programmation. Particulièrement, Henderson et al. (2017) utilisent MATLAB pour modéliser la spatialisation d'une chaîne d'approvisionnement à travers une série de matrices interconnectées, ce qui leur permet d'attribuer des émissions à différentes régions simultanément.

Cependant, selon Frischknecht et al. (2019), une collaboration poussée concernant les interfaces entre les différents outils d'ACV est nécessaire pour faciliter la spatialisation de l'inventaire. Par conséquent, les groupes d'experts en régionalisation et spatialisation devraient établir des normes et des formats pour assurer la compatibilité entre les différents logiciels. Bien que la plupart des outils spatialisent les données au niveau des processus, il serait théoriquement possible de spatialiser même les émissions à une échelle plus fine, par exemple en utilisant une carte raster pour attribuer les émissions à des processus individuels. Cette approche demeure cohérente à condition que l'échelle de l'ICV spatialisé corresponde à la résolution native de la méthode d'impact. Cependant, si certains flux de l'ICV sont spatialisés à l'échelle nationale ou continentale, plutôt qu'à l'échelle de résolution native de la catégorie d'impact en question, il est impératif que l'agrégation des FC régionalisés natifs à une échelle moins détaillée respecte les choix de pondération entre les cellules de résolution native des développeurs des méthodes d'impact. Ainsi, si un logiciel d'ACV effectue une agrégation en attribuant un poids égal aux FC de chaque cellule ou utilise la superficie des cellules pour les pondérer, le FC agrégé différera de celui calculé par la méthode d'impact. Par exemple, IMPACT World+ utilise des pondérations dans l'agrégation des FC régionalisés natifs basées sur la probabilité d'émissions ou de consommation des flux élémentaires dans chaque cellule de résolution native (Bulle et al., 2019).

3.4 Méthodes d'évaluation des impacts de cycle de vie

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. Comme dans le cas de l'inventaire, le manque de cette information peut induire à des conclusions erronées. Comme mentionné dans la section 3.5.2, le niveau d'agrégation des FC peut aussi jouer un rôle important dans les résultats finaux.

À titre d'exemple, la Figure 15 illustre les FC utilisés pour évaluer les impacts de la rareté de l'eau, selon la méthode AWARE (Boulay et al., 2018), intégrée à la méthode d'ÉICV IMPACT World+. Cette représentation met en lumière une variation significative des FC pour les États-Unis, s'étendant sur environ trois ordres de grandeur. Cette ampleur de variation, bien évidemment, ne peut être appréhendée dans les FC agrégés au niveau national. Ainsi, en ce qui concerne la rareté de l'eau, l'échelle nationale ne permet pas de rendre compte de la variabilité spatiale présente à l'intérieur du pays.

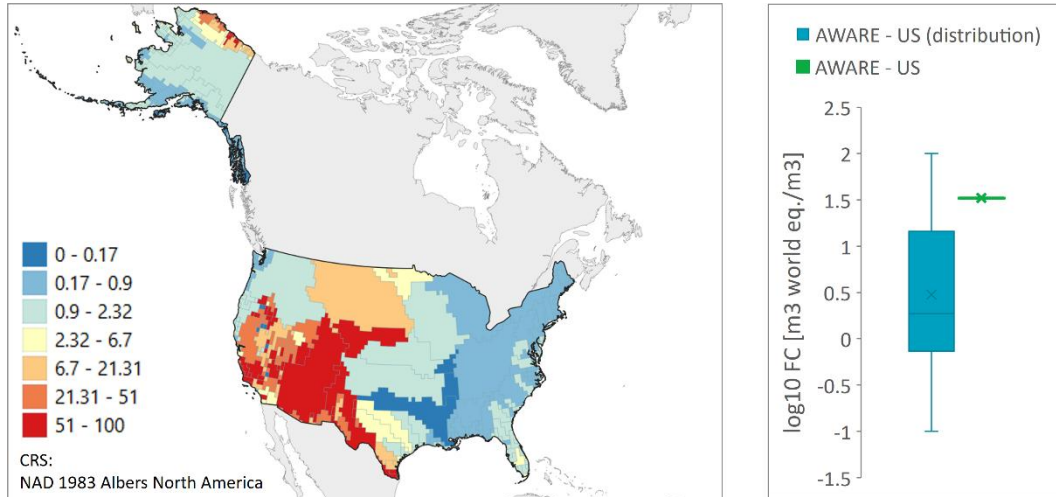


Figure 15. FC pour l'évaluation de la rareté d'eau [m³ world eq./m³ consommées dans la région i]. Moyenne arithmétique sur douze mois. Zoom sur les États-Unis, basée sur Boulay et al. (2018).

La revue de littérature met en évidence qu'après la parution du rapport antérieur de ScoreLCA sur la prise en compte en la dimension géographique en ACV (Patouillard et al., 2015), plusieurs méthodes régionalisées d'évaluation des impacts ont été publiées. Bien que la Figure 16 ne couvre pas de manière exhaustive le développement des méthodes intégrant la dimension spatiale dans le calcul des FC, il est pertinent de souligner les travaux pionniers de Potting et al. (1998) sur l'acidification, mettant en lumière la nécessité de prendre en compte la dimension spatiale en ACV. De plus, la Figure 16 illustre la publication de méthodes d'impact spécifiques à un indicateur qui ont été, dans certains cas, intégrées dans des méthodes d'évaluation d'ÉICV complètes, telles que ReCiPe (Huijbregts et al., 2017), IMPACT World+ (Bulle et al., 2019) et LC-IMPACT (Verones et al., 2020). Ces trois méthodes sont décrites dans la section 3.4.1.

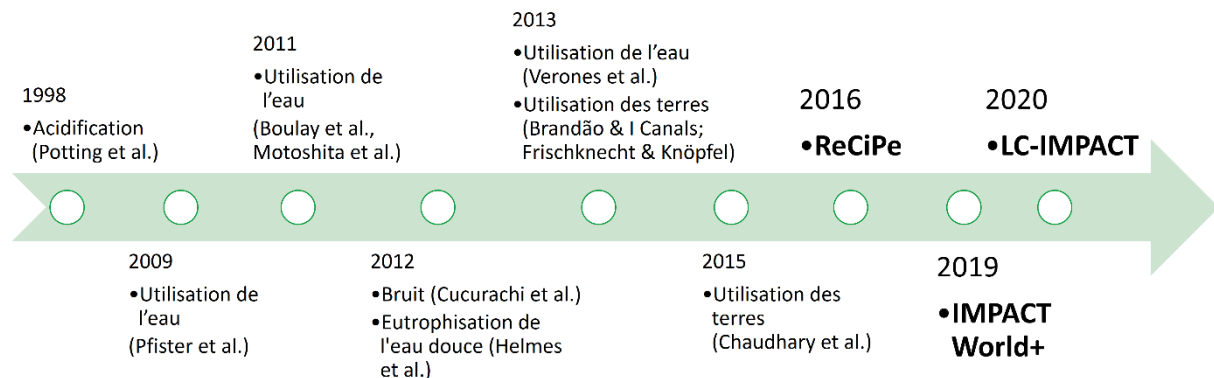


Figure 16. Chronologie non exhaustive des catégories d'impact régionalisées et des méthodes d'ÉICV.

À l'heure actuelle, la plupart des indicateurs recommandés comme meilleures pratiques par l'Initiative pour le cycle de vie du PNUE sont régionalisés (Frischknecht & Jolliet, 2017, 2019). Cependant, d'autres modèles régionalisés pour plusieurs catégories d'impact sont en cours de développement, bien qu'ils ne soient pas encore pleinement opérationnels à l'échelle mondiale ou intégrés dans les logiciels ACV (Tableau 11). Par exemple, des efforts sont déployés pour calculer des FC afin d'évaluer les impacts des plastiques en milieu marin (Corella-Puertas et al., 2023; Corella-Puertas et al., 2022), la fragmentation des terres (Kuipers et al., 2021), l'acidification des océans (Scherer et al., 2022), ainsi que les impacts sonores sur la santé humaine (Meyer et al., 2019; Piao et al., 2022). D'autres problématiques telles que la salinisation, les impacts des espèces invasives, la fragmentation des habitats d'eau douce, les dommages aux fonds marins ou les effets du bruit et de la lumière sur les

écosystèmes sont jusqu'à présent soit absents soit insuffisamment couverts, et présentent également une variabilité spatiale importante. Le concept de valeur instrumentale de la nature ou services écosystémiques est également absent de l'ACV et est en cours de développement, nécessitant également une intégration des aspects spatiaux (Elliot et al., 2022; Rugani et al., 2019).

En outre, les méthodes d'ÉICV prennent en compte divers niveaux de régionalisation ou de résolution spatiale afin d'incorporer les spécificités du milieu récepteur et de la portée spatiale des interventions environnementales. Par exemple, dans le cas des émissions dont le transfert atmosphérique est important, les impacts ne sont pas nécessairement observés dans la localisation du point d'émission et une différenciation spatiale au niveau de cellules sur une grille mondiale est nécessaire, particulièrement dans le cas de l'acidification. En revanche, pour d'autres catégories dont le lieu d'émission a peu d'influence, comme le réchauffement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone, un FC générique peut être utilisé (Figure 17). De plus, une étude a révélé que dans certaines situations, la définition de l'échelle native des méthodes d'ÉICV est principalement orientée par la disponibilité des données (Mutel, Liao, Patouillard, Bare, Fantke, Frischknecht, Hauschild, Jolliet, de Souza, et al., 2019). Pour cette raison, l'initiative GLAM a souligné la nécessité pour les développeurs des méthodes d'ÉICV de justifier le choix de l'échelle native et d'indiquer si, dans d'autres conditions, une autre échelle serait préférable (Frischknecht & Jolliet, 2017).

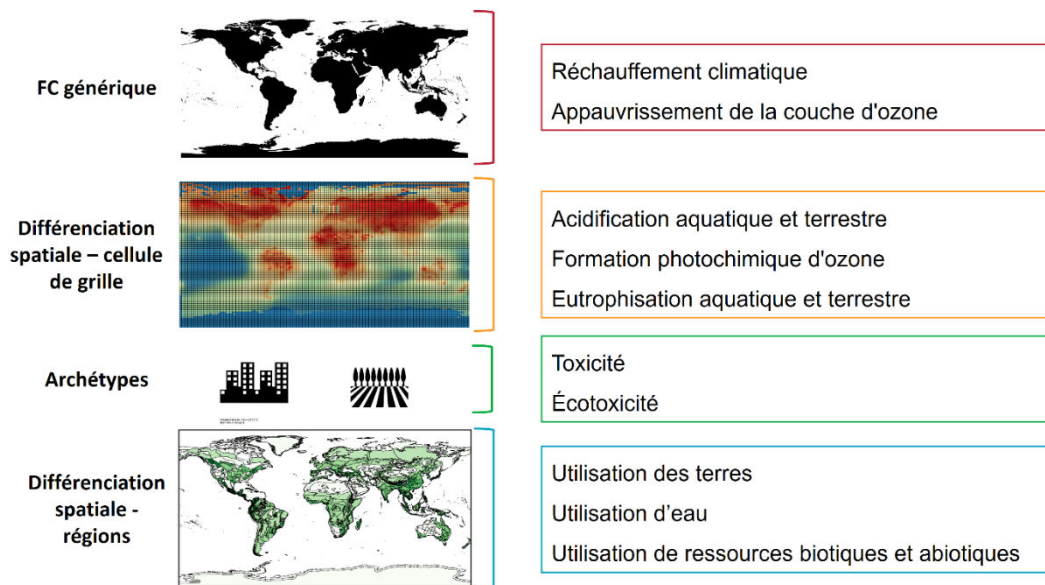


Figure 17. Niveau de régionalisation des modèles d'ÉICV. Adapté de Patouillard (2018).

Pour simplifier l'opérationnalisation et application des méthodes d'ÉICV, certains auteurs proposent d'avoir un ensemble harmonisé de quelques archétypes pour les sites d'émission (Alejandro et al., 2022). Cette approche s'avère pertinente pour certaines catégories d'impact pour lesquelles elle a été mise en œuvre. Par exemple, la densité de population, étant le paramètre géographiquement variable le plus influent en matière d'effets respiratoires des particules fines, est un choix évident. Dans ce cas, l'utilisation d'archétypes basés sur la densité de population est une solution simple à mettre en œuvre (Frischknecht & Jolliet, 2017). Cependant, ce raisonnement devient moins applicable lorsque les paramètres les plus influents et géographiquement variables pour une catégorie d'impact sont plus complexes à appréhender par un praticien. Par exemple, Kounina et al. (2014) ont tenté de développer des archétypes pour les impacts d'écotoxicité aquatique, et le paramètre clé identifié était la présence d'un lac en amont. Cette présence augmente le temps de résidence des contaminants dans l'eau douce et l'exposition des écosystèmes d'eau douce. Il est cependant peu réaliste de s'attendre à ce que les praticiens et les développeurs de bases de données aient accès facilement à cette information lors de leur collecte de données. Par conséquent, la mise en œuvre de tels archétypes devient plus complexe dans ce contexte.

Pour faciliter la mise en œuvre des FC régionalisés, les méthodes d'ÉICV calculent des FC agrégés à l'échelle mondiale, continentale et nationale. Par exemple, IMPACT World+ détermine des FC agrégés en prenant en compte une pondération spatiale basée sur la probabilité d'émission ou de consommation des flux élémentaires selon la catégorie d'impact (Bulle et al., 2019). Cependant, réduire le niveau de résolution des FC entraîne une augmentation de leur incertitude due à la variabilité spatiale (Figure 18). Bien que cette incertitude soit parfois rapportée dans les articles scientifiques décrivant les méthodes d'ÉICV, elle n'est pas incluse dans les logiciels ACV, la plupart des logiciels ne permettant pas d'inclure ce type de données (SimaPro, LCA for Experts)⁵. Cette lacune empêche l'intégration de l'incertitude des FC dans les analyses d'incertitude de type Monte-Carlo, par exemple.

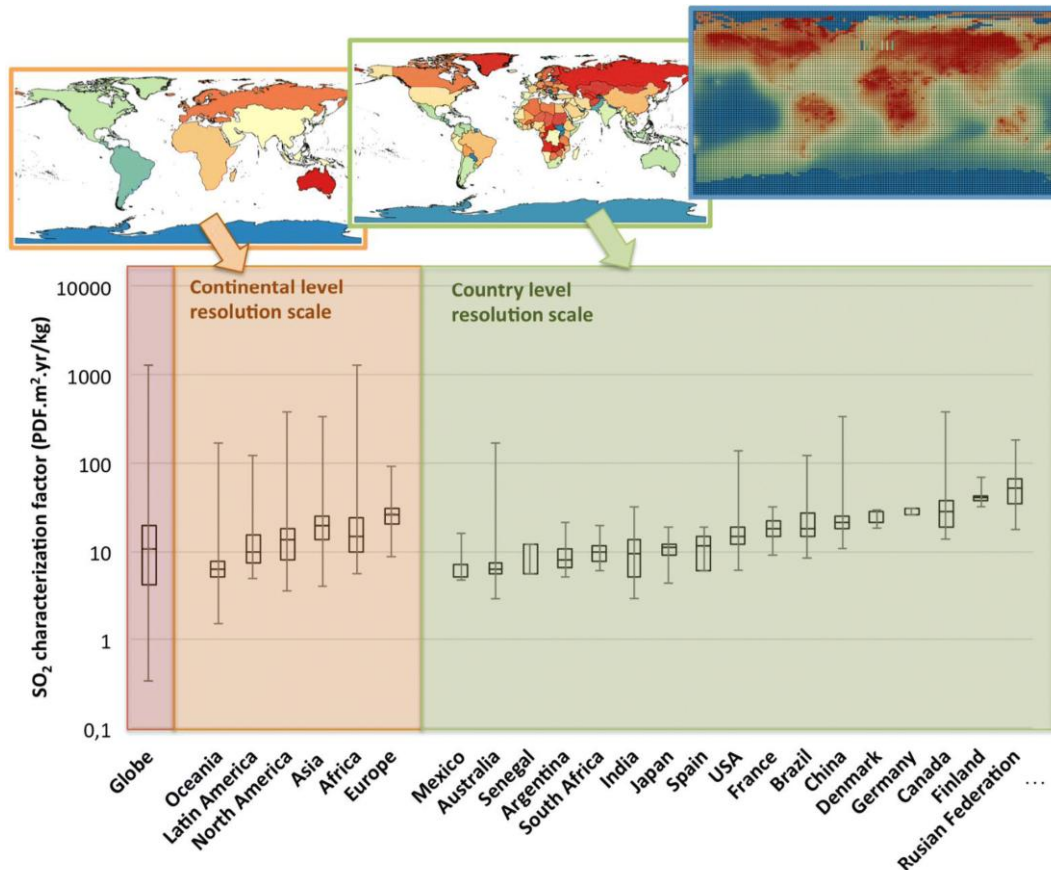


Figure 18. Impact du niveau d'agrégation sur l'incertitude liée à la variabilité spatiale : exemple du FC de l'acidification terrestre du dioxyde de soufre (SO₂) aux échelles de résolution mondiale, continentale et nationale. Les diagrammes en boîte à moustaches représentent les 5e, 25e, 75e et 95e percentiles ainsi que la médiane dans chaque région (Bulle et al., 2019).

Bien que peu développée, la **spatialisation des impacts** (représente aussi un enjeu clé pour la prise en compte des aspects géographiques en ACV. La sensibilité des milieux aux différents impacts varie selon la localisation géographique et cette question est considérée lors du calcul de FC régionalisées comme par exemple ceux intégrés dans IMPACT World+ : la quantité d'eau disponible et les demandes en eau de la population et les écosystèmes pour la catégorie *Rareté de l'eau*, la capacité d'adaptation de chaque pays selon le PIB pour les effets sur la santé humaine liés au manque d'eau, la capacité d'absorption et la concentration de base pour l'acidification terrestre, etc. Or, deux enjeux majeurs sont liés à cette problématique de spatialisation :

⁵ openLCA et Brightway sont, à notre connaissance, les seuls à permettre l'inclusion de cette information.

- Les catégories d'impact qui intègrent des aspects géographiques dans leur calcul tiennent compte de cette variabilité spatiale pour fournir des FC différenciés spatialement uniquement en fonction du point d'émission;
- Pour certaines catégories d'impact, cette variation spatiale n'est pas encore considérée pleinement.

Les travaux de Li et al., (2022) sont un exemple de **spatialisation des impacts « destination »** pour la qualité des écosystèmes (perte d'espèces de poisson) en fonction de la sensibilité des milieux récepteurs à l'augmentation de température et de la variation de la température par région. La Figure 19 montre la variabilité spatiale des impacts projetés du changement climatique selon quatre RCP (Profils représentatifs d'évolution de concentration) sur une période de 100 ans sur les poissons. Cette étude montre la pertinence de tenir compte de la variabilité spatiale des effets du changement climatique sur les écosystèmes lorsqu'une information sur la destination de l'impact est requise. Pour cette catégorie d'impact, la mise en œuvre de la spatialisation est relativement simple puisqu'il n'est pas nécessaire de spatialiser les flux élémentaires de gaz à effet de serre. Cependant, la mise en œuvre de la spatialisation des impacts s'avère plus complexe pour les catégories d'impact régionalisées. En effet, chaque cellule d'origine de chaque flux élémentaire nécessite l'utilisation d'une matrice source-réception, ce qui signifie qu'il existe une carte de distribution spécifique des impacts pour chaque point d'origine de chaque flux élémentaire.

Il est néanmoins important de considérer que la spatialisation de l'impact peut être pertinente mais elle est moins cruciale que la régionalisation : ne pas régionaliser l'impact peut mener à une mauvaise décision car ça entraîne une grande incertitude sur les FC utilisés. Ne pas spatialiser l'impact change très peu dans la mise en œuvre de l'ACV ; on considère simplement que peu importe où l'impact a lieu, il est tout aussi grave et doit être pris en compte.

Il est essentiel de souligner qu'une ACV spatialisée ne devrait se limiter au changement climatique, mais devrait également intégrer d'autres catégories d'impact. Chaque catégorie d'impact nécessite une attention particulière et une méthodologie appropriée à son étendue spatiale, afin d'assurer une intégration cohérente des dimensions spatiales dans la chaîne de cause à effet. De plus, tenter d'agrèger des résultats spatialisés selon la destination avec ceux fondés sur l'origine constituerait une erreur susceptible de mener à des interprétations erronées. Il est donc impératif de garder à l'esprit la nature des impacts spatialisés, qu'ils soient d'origine ou de destination, pour éviter des agrégations incorrectes et garantir une interprétation précise des résultats d'une ACV spatialisée.

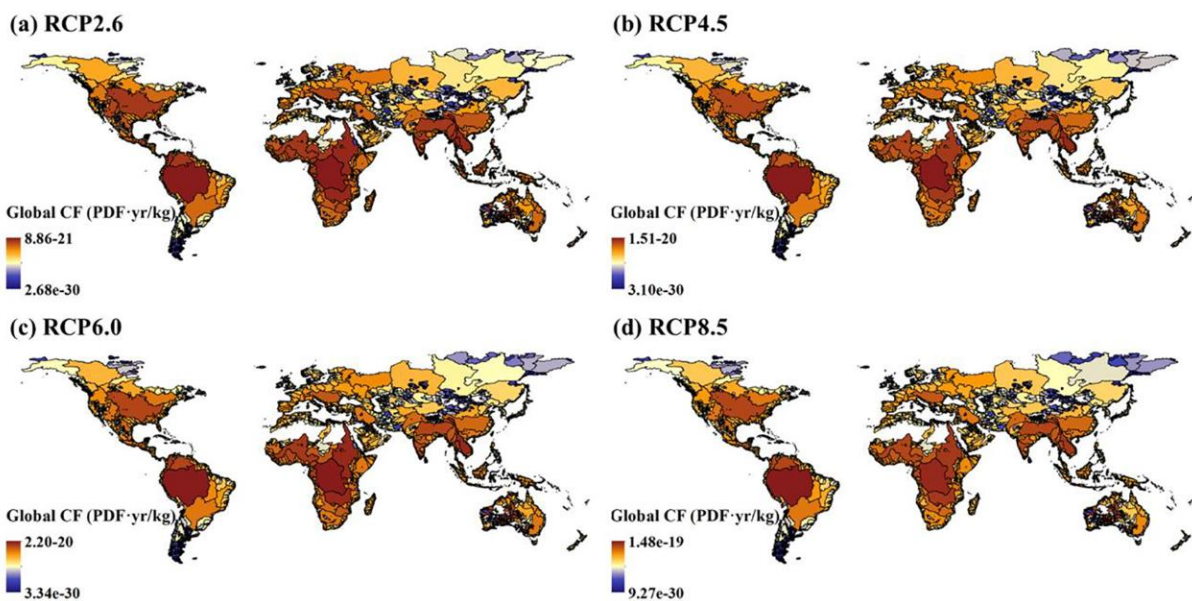






Figure 19. Impacts mondiaux du CO₂ sur les espèces de poissons d'eau douce au niveau du bassin versant pour quatre RCP (Representative Concentration Pathways, Profils représentatifs d'évolution de concentration). Tiré de Li et al., (2022)

3.4.1 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 publiée, 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).

Dans les tableaux de cette section décrivant le niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels d'ACV pour les méthodes d'ÉICV, nous utilisons la légende suivante :

- **Pays** : Les FC sont agrégés pour chaque flux élémentaire, avec un niveau de régionalisation par pays (par exemple, un flux d'eau en France). 
- **Archétypes** : Les FC sont différenciés en fonction de caractéristiques pertinentes pour une catégorie d'impact donnée. Notamment, une distinction est faite en fonction de la densité de population pour les catégories associées aux impacts sur la santé humaine (*low population density et high population density*). 
- **Sous-compartiment** : Les FC sont accessibles dans le logiciel, cependant, ils ne comportent pas de distinction spatiale par pays ou par archétype. La seule différenciation est effectuée selon le sous-compartiment d'émission, par exemple *groundwater, lake, ocean, ou river*. 
- **Pays et archétypes** : Les FC sont différenciés spatialement à la fois par pays et par archétype. 

3.4.1.1 IMPACT World+

La méthode IMPACT World+ a été développée pour répondre à l'impératif de régionalisation des impacts. Sa version la plus récente, la 2.0.1 (Bulle et al., 2019), est disponible avec une documentation complète sur le site dédié (<https://www.impactworldplus.org>). Elle comporte 12 groupes de catégories d'impact au niveau problème (la version *Midpoint*) et 11 groupes au niveau des dommages (la version *Expert*). Pour les praticiens en ACV, IMPACT World+ offre une version *Footprint* axée sur une communication plus accessible avec les parties prenantes. La Figure 20 illustre l'ensemble des catégories couvertes, y compris celles qui sont régionalisées. Lorsque les données le permettent, IMPACT World+ fournit les FC régionalisés natifs, ainsi qu'agrégés au niveau national, continental et mondial (Tableau 22, en Annexe 8.2). Pour certaines catégories d'impact, la régionalisation est aussi proposée sous forme d'archétypes, avec des FC par défaut au niveau mondial ou continental lorsque cela est réalisable. Il est important de noter qu'il reste encore des indicateurs non régionalisés, mais dont la régionalisation serait souhaitable pour une meilleure précision, tel que l'indicateur de dommage de pollution thermique de l'eau.

L'agrégation spatiale des FC dans IMPACT World+ repose sur la probabilité d'occurrence du flux élémentaire dans chaque cellule de résolution native (émission, utilisation de l'eau ou utilisation des terres). Étant donné que les caractéristiques spatiales des divers impacts varient, leur résolution native diffère également. Par exemple, les impacts liés à l'eau sont définis avec une résolution native basée sur les bassins versants, tandis que ceux liés à la biodiversité sont évalués selon les biomes. L'ensemble de données des FC est accessible via un dossier Zenodo (<https://zenodo.org/records/8200703>), incluant les FC à résolution native. Cependant, le niveau de régionalisation possible pour le praticien dépend du logiciel d'ACV utilisé (section 3.5.2). Dans la base de données native d'IMPACT World+, la variabilité spatiale associée à l'agrégation des FC à une échelle de résolution native moins détaillée est documentée, mais cette incertitude sur les FC due à la variabilité spatiale n'est pas opérationnalisée ni implémentée dans tous les logiciels d'ACV.

Le Tableau 5 révèle des disparités quant au niveau de résolution spatiale des catégories d'impact régionalisées de la méthode IMPACT World+ implémentées dans les logiciels d'ACV tels que SimaPro, LCA for experts (GaBi), Brightway et openLCA. Au moment de la rédaction de ce rapport, SimaPro permet l'implémentation au niveau national pour 8 des 11 catégories régionalisées de la version 2.0.1. En revanche, openLCA propose 5 catégories au niveau national et 2 au niveau des archétypes. Avec le logiciel Brightway, les catégories d'impact sont implémentées en fonction des archétypes ou des sous-compartiments. Il est important de souligner qu'avec l'utilisation de la librairie Python *Regioninvent* (Agez, 2024), il est possible de créer une version régionalisée de la méthode IMPACT World+ dans Brightway. Cette approche permet d'intégrer des catégories d'impact telles que la rareté de l'eau, l'utilisation des terres, ainsi que les catégories d'acidification et d'eutrophisation. La méthode IMPACT World+ n'est pas disponible dans le logiciel LCA for Experts.

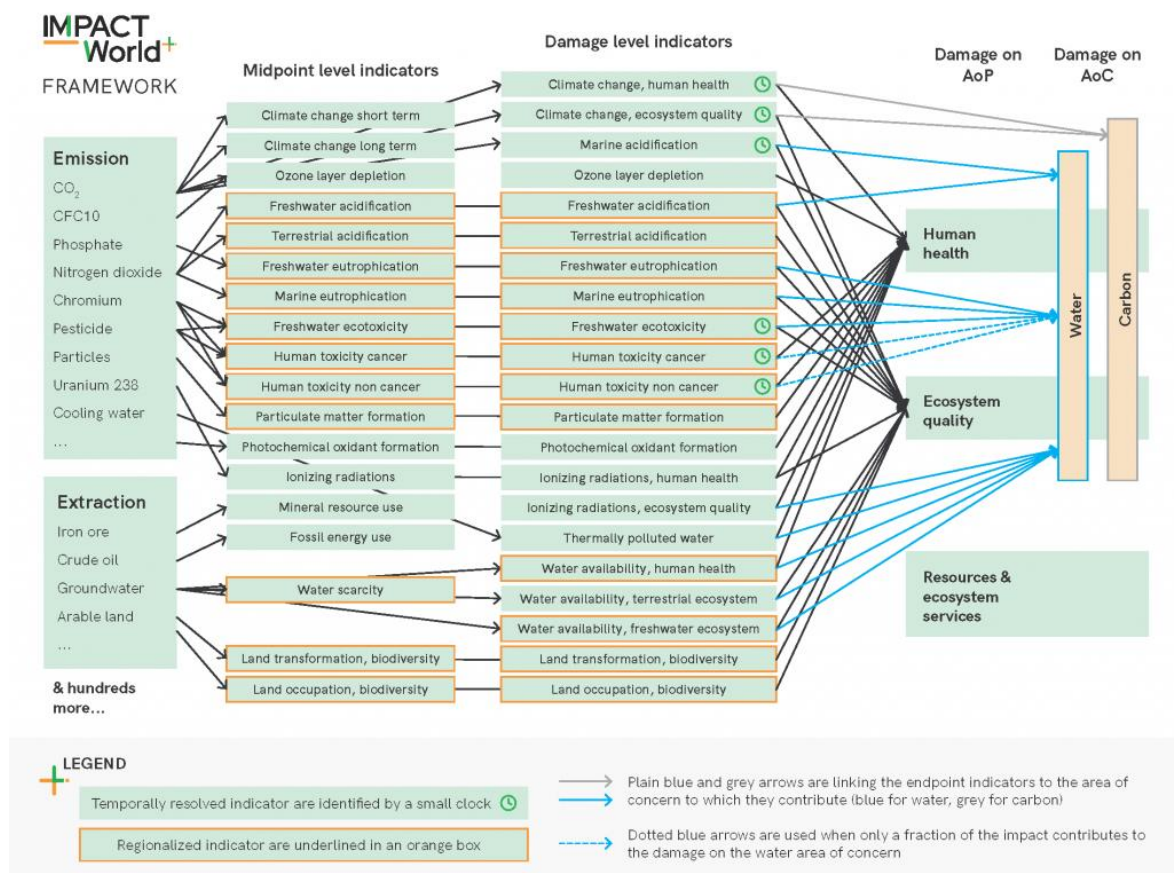






































Figure 20. Indicateurs inclus dans IMPACT World+ (Bulle et al., 2019). Les indicateurs régionalisés sont identifiés dans un encadré orange.

Tableau 5. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la version 2.0.1 de la méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for Experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Intégrée au logiciel	Oui	Non	Oui	Oui
Résolution spatiale implémentée				
Acidification aquatique (eau douce)				
Acidification terrestre				
Eutrophisation marine				
Rareté d'eau				
Eutrophisation aquatique (eau douce)				
Écotoxicité (eau douce)				
Cancérigène				
Non cancérigène				
Respiratoires inorganiques				
Transformation de terres				
Utilisation de terres				
Légende	Pays 	Archétype 	Sous-compartiment 	

3.4.1.2 ReCiPe2016

La méthode ReCiPe2016 représente une mise à jour de la version de 2008. Elle se compose de 17 catégories d'impact au niveau problème, selon trois aires de protection (Figure 21). Alors que la version de 2008 fournissait des FC représentatifs à l'échelle européenne, la version de 2016 propose des FC également représentatifs à l'échelle mondiale, ainsi qu'à des résolutions nationales et continentales pour certaines catégories d'impact (Huijbregts et al., 2017). Plus précisément, des FC régionalisés ont été calculés pour les catégories de formation de particules fines, de formation photochimique d'ozone, d'acidification terrestre, d'eutrophisation (eau douce) et de consommation d'eau (Tableau 23 en Annexe 8.2).

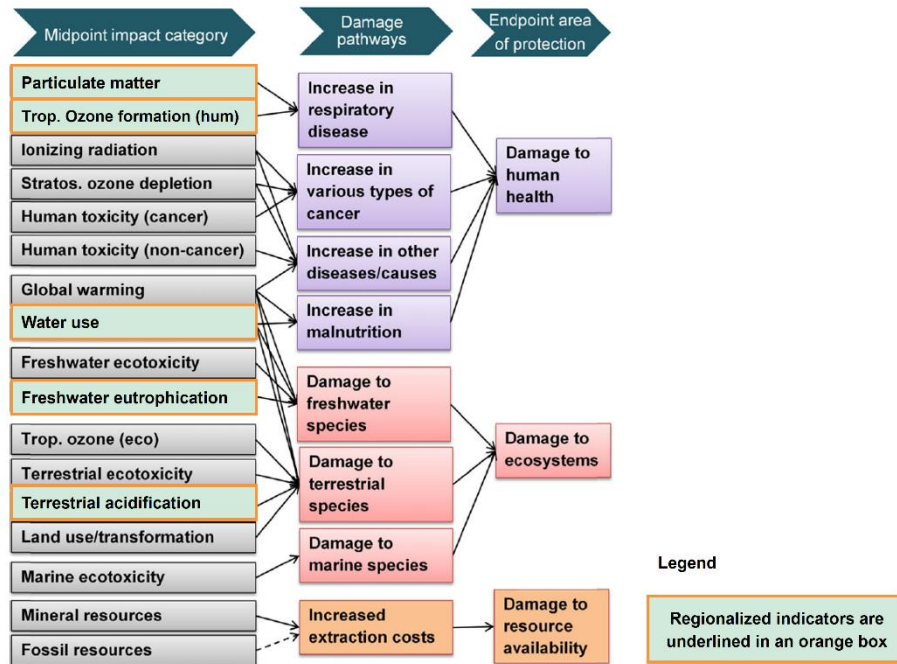











Figure 21. Indicateurs inclus dans ReCiPe2016. Les indicateurs régionalisés sont identifiés dans un encadré orange. Adapté de Huijbregts et al. (2017)

L'ensemble des FC de ReCiPe2016 est accessible sur le site du *National Institute for Public Health and the Environment. Ministry of Health, Welfare and Sport* des Pays-Bas (<https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>), ainsi qu'en annexe de la publication détaillant la méthode d'impact (Huijbregts et al., 2017). Cependant, il convient de noter que les FC natifs des catégories répertoriées dans le Tableau 23 ne sont pas disponibles sur le site web de la méthode.

Le Tableau 6 met en évidence les disparités concernant la résolution spatiale des catégories d'impact régionalisées de la méthode ReCiPe2016, telles qu'intégrées dans les logiciels d'ACV comme SimaPro, LCA for experts (GaBi), Brightway et openLCA. Quatre catégories régionalisées de ReCiPe2016 ont été implémentées dans le logiciel SimaPro au niveau national. En revanche, le logiciel openLCA ne propose qu'une seule catégorie d'impact au niveau national (utilisation de l'eau), un au niveau des archétypes et 3 par sous-compartiment. À l'heure actuelle, une seule catégorie d'impact régionalisée de ReCiPe2016 est disponible au niveau des archétypes dans Brightway et les trois restants sont disponibles par sous-compartiments. La méthode ReCiPe20216 n'est pas disponible dans le logiciel LCA for Experts.

Tableau 6. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la méthode ReCiPe2016 (Huijbregts et al., 2017).

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for Experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Intégrée au logiciel	Oui	Non	Oui	Oui
Résolution spatiale implémentée				
Formation de particules fines				
Formation photochimique d'ozone				
Acidification terrestre				

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for Experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Eutrophisation aquatique (eau douce)				
Utilisation de l'eau				
Légende	Pays	Archétype	Sous-compartiment	

3.4.1.3 EF3.0

La méthode *Environmental Footprint* (EF) a été développée par la Commission Européenne pour quantifier l'empreinte environnementale de produits et d'organisations (PEF et OEF). Ce cadre méthodologique recommande l'utilisation de 16 catégories d'impact au niveau des problèmes (Tableau 24 en Annexe 8.2). Parmi ces 16 catégories d'impact, seules les catégories d'utilisation des terres et de l'eau intègrent des considérations régionales (EPLCA, 2024).

Le Tableau 7 montre les différences concernant la résolution spatiale des catégories d'impact régionalisées de la méthode EF3.0, comme elles sont intégrées dans les logiciels d'ACV SimaPro, LCA for Experts (GaBi), Brightway et openLCA. Les deux catégories régionalisées d'EF3.0 sont implémentées dans les logiciels SimaPro et LCA for expert au niveau national. En revanche, le logiciel openLCA n'a intégré que la catégorie d'utilisation d'eau à l'échelle nationale, tandis que l'utilisation des terres est implémentée selon des sous-compartiments (ou catégories). À ce jour, les deux catégories d'impact régionalisées d'EF3.0 ne sont disponibles qu'en fonction de sous-compartiments dans Brightway.

Tableau 7. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la méthode EF3.0 (EPLCA, 2024)

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for Experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Intégrée au logiciel	Oui	Oui	Oui	Oui
Résolution spatiale implémentée				
Utilisation des terres				
Utilisation de l'eau				
Légende	Pays	Archétype	Sous-compartiment	

3.4.1.4 LC-IMPACT

La méthode d'impact LC-IMPACT comporte 11 catégories d'impacts évaluées exclusivement au niveau des dommages, en fonction des aires de protection de la santé humaine, de la qualité des écosystèmes et des ressources naturelles (Figure 22). Sept des onze catégories d'impact de la méthode LC-IMPACT prennent en compte une différenciation spatiale à divers niveaux. En plus de développer des FC régionalisés à l'échelle mondiale, continentale et nationale, la méthode LC-IMPACT visait à intégrer les aspects de vulnérabilité à l'extinction des espèces dans l'évaluation de la qualité des écosystèmes (Verones et al., 2020).

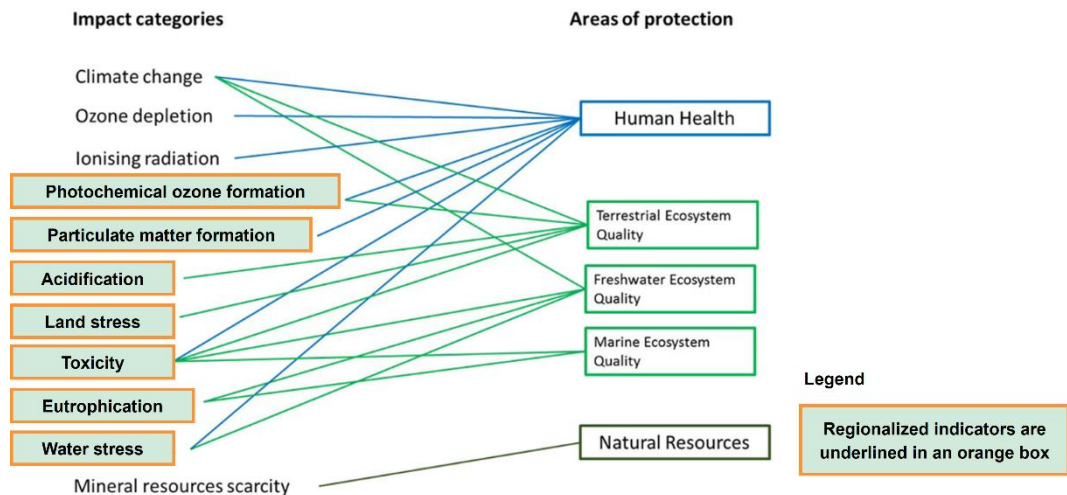























Figure 22. Indicateurs inclus dans LC-IMPACT. Les indicateurs régionalisés sont identifiés dans un encadré orange. Adapté de Verones et al. (2020).

L'ensemble de FC de la méthode LC-IMPACT est disponible sur le site dédié (<https://lc-impact.eu/>). Pour ce qui est des catégories d'impact prenant en compte la dimension spatiale, des fichiers SIG sont également disponibles sur le site (*shapefile, raster, couche Google Earth*). Le Tableau 25 (en Annexe 8.2) répertorie les facteurs pris en compte dans les catégories d'impact régionalisées de la méthode LC-IMPACT, ainsi que le degré de régionalisation des FC natifs. Il convient de noter que dans la Figure 22, la catégorie *Toxicity* englobe à la fois les catégories d'impact de toxicité humaine et d'écotoxicité, tandis que la catégorie *Eutrophication* inclut celle de l'eau douce et l'eutrophisation marine, ce qui justifie ces distinctions dans le Tableau 8.

Le Tableau 8 montre les différences de résolution spatiale des catégories d'impact régionalisées de la méthode LC-IMPACT dans les logiciels d'ACV SimaPro, LCA for Experts (GaBi), Brightway et openLCA. 7 des 9 catégories régionalisées de LC-IMPACT sont intégrées dans le logiciel SimaPro au niveau national. Les catégories d'impact de toxicité humaine et d'écotoxicité ne sont cependant disponibles qu'en archétypes. Selon la description des développeurs d'openLCA, la méthode LC-IMPACT y est implémentée avec le même niveau de régionalisation que dans SimaPro et il est également possible d'utiliser des cartes de FC pour mener des analyses géospatiales avec cette méthode. Cependant l'utilisation de la méthode LC-IMPACT nécessite l'acquisition d'une licence sur le site openLCA Nexus (Serafini & Ciroth, 2024) et n'a pas été testée pour cette étude. Par ailleurs, à ce jour, l'installation de base de Brightway n'inclut pas par défaut la méthode LC-IMPACT. Toutefois, une bibliothèque en Python a été développée pour l'importer dans Brightway afin de réaliser des analyses géospatiales (<https://github.com/cmotel/bw2-lcimpact>). La section 3.5.2 introduit l'approche de régionalisation par analyse géospatiale dans Brightway et présente plus en détail cette librairie. Par ailleurs, la méthode n'est pas disponible dans le logiciel LCA for Experts.

Tableau 8. Niveau de résolution spatiale intégré dans les logiciels ACV de la méthode LC-IMPACT (Verones et al., 2020).

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for Experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Intégrée au logiciel	Oui	Non	Non	Oui
Résolution spatiale implémentée				
Formation photochimique d'ozone				

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for Experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Formation de particules fines				
Acidification terrestre				
Stress terrestre				
Toxicité				
Écotoxicité				
Eutrophisation aquatique (eau douce)				
Eutrophisation aquatique (eau marine)				
Stress hydrique				
Légende	Pays 	Archétype 	Sous-compartiment 	
* Dans la version disponible, les FC de stress hydrique ne varient pas en fonction du pays.				

3.4.1.5 Méthode GLAM

La méthode d'impact issue du projet GLAM (*Global Guidance for Life Cycle Assessment Indicators*) de l'UNEP est en cours de développement et vise à intégrer des modèles environnementaux plus sophistiqués, englobant diverses catégories d'impact (Frischknecht & Jolliet, 2017, 2019). La publication de la méthode est prévue pour le dernier trimestre de l'année 2024, étant la version beta déjà disponible⁶. Pour cette raison, cette section se concentre sur les principales recommandations de GLAM concernant la différenciation spatiale des méthodes d'impact, présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9. Recommandations de GLAM concernant les aspects spatiaux des méthodes d'impact (Frischknecht & Jolliet, 2017, 2019).

Aspects	Recommandations
Choix de l'échelle spatiale	<p>L'échelle spatiale choisie doit être en adéquation avec la nature de l'impact, trouvant un juste équilibre entre la représentation du système étudié et la disponibilité des données.</p> <p>Il est impératif pour le modélisateur de documenter clairement les paramètres régionalisés et leur échelle spatiale respective. De plus, il est recommandé d'inclure des observations sur d'éventuelles préférences pour une échelle spatiale différente ou sur les limitations liées à la disponibilité des données.</p>

⁶ Une version de la méthode incluant trois aires de protection (*Human health, Ecosystems quality et Ecosystems services*) est disponible depuis octobre 2024 sur <https://www.lifecycleinitiative.org/activities/life-cycle-assessment-data-and-methods/global-guidance-for-life-cycle-impact-assessment-indicators-and-methods-glam/> Néanmoins, la documentation disponible (résumé de deux pages par aire de protection) n'est pas assez détaillée pour approfondir l'analyse.

Aspects	Recommandations
	Enfin, afin de garantir la qualité du modèle, il est fortement conseillé d'éviter l'utilisation de données à basse résolution dans des modèles à haute résolution.
Cartes et données spatiales	Les développeurs de méthodes d'impact sont encouragés à créer des cartes de FC régionalisés natifs, conformes aux normes du Consortium Géospatial Ouvert. Les cartes doivent être géoréférencées de manière appropriée, spécifiant des valeurs <i>nodata</i> et étant accessibles aux utilisateurs, de préférence via les publications scientifiques.
Agrégation	Il est recommandé que les développeurs de méthodes d'impact agrègent les FC aux échelles nationale, continentale et mondiale, en fournissant une explication détaillée de leur méthode de calcul. Les valeurs agrégées doivent être des moyennes pondérées, basées sur la consommation ou les émissions, et rapportées selon des formats standard.
Incertitude et variabilité spatiale	La variabilité à une résolution plus fine peut générer de l'incertitude lors de l'agrégation à une échelle plus large. Il est recommandé d'au moins inclure la médiane, la moyenne et les intervalles de confiance à 95% pour la résolution native, et de fournir des informations de distribution similaires pour toutes les valeurs agrégées.

Enfin, le Tableau 10 illustre les différents types de proxies employés pour agréger les FC natifs selon quelques catégories d'impact régionalisées. Chaque méthode d'évaluation d'impacts, telle qu'IMPACT World+, LC-IMPACT et ReCiPe 2016, utilise des proxies spécifiques, adaptés à chaque catégorie d'impact, afin d'agréger les FC natifs en fonction des données telles que les émissions, la population ou la superficie des écorégions. Cette diversité d'approches d'agrégation souligne les différentes méthodologies mises en œuvre pour passer d'une résolution spatiale fine à une échelle compatible avec celle de l'inventaire.

Tableau 10. Proxies de pondération pour agréger les FC natifs à des échelles nationales, continentales et mondiales pour des catégories d'impact régionalisées (liste non exhaustive adaptée de Mutel et al. 2019). NR : Non régionalisé ; ND : Non disponible

Catégorie d'impact	Flux élémentaire	IMPACT World+	LC-IMPACT	ReCiPe 2016
Formation photochimique d'ozone	Émission (kg)	Quantité de débit annuel	NR	Quantité de débit annuel
Formation de particules	Émission (kg)	Quantité de débit annuel	Population	Quantité de débit annuel
Acidification terrestre	Émission (kg)	Quantité de débit annuel	Quantité de débit annuel	Quantité de débit annuel
Acidification aquatique	Émission (kg)	Émissions liées aux applications d'engrais et de fumier; Superficie cultivée (pour l'érosion)	Quantité de débit annuel et population	Population

Eutrophisation marine	Émission (kg)	ND	Quantité de débit annuel aéroporté	ND
Stress terrestre	Occupation de terres (m ² /year), transformation de terres (m ²)	Superficie totale de l'écorégion (indicateur de biodiversité)	Superficie de l'écorégion utilisée pour chaque type d'utilisation des terres; Superficie des zones climatiques ou des zones biologiques de Holridge utilisée pour chaque type d'utilisation des terres	NR
Stress hydrique	Consommation d'eau (m ³)	Consommation d'eau	Consommation d'eau	Consommation d'eau

3.4.2 Développements récents dans la régionalisation des impacts (revue de littérature)

Depuis le précédent rapport (Patouillard et al., 2015), de nombreux modèles de caractérisation régionalisés pour différents impacts ont été publiés. Par conséquent, notre attention ne se porte pas sur un impact spécifique, mais nous visons à fournir une sélection d'études proposant des FC régionalisés (Tableau 11). Il convient de noter que des méthodes d'ÉICV telles qu'IMPACT World+ et ReCiPe 2016 ont déjà été abordées à la section 3.4.1.

Tableau 11. Liste des nouveaux facteurs de caractérisation régionalisés identifiés.

Impact	Couverture	Utilisé dans ou développée par
Land use, soil erosion	Global	(Alejandre et al., 2022)
Water scarcity	Europe	(Ansorge & Beránková, 2017)
Ecosystem services	Framework	(Arbault et al., 2014)
Atmospheric metal deposition	Global	(Aziz et al., 2018)
Water pollution (chemical oxygen demand)	System boundary	(Bai et al., 2019)
Eutrophication	System boundary	(Beltran et al., 2023)
Human toxicity	Europe	(Belyanovskaya et al., 2020)
Water scarcity	Global	(Boulay et al., 2018)
Land use	Global	(Bos et al., 2020)
Human toxicity	China	(Chen et al., 2016)
Microplastics emissions	Italy, Denmark	(Croxatto Vega et al., 2021)

Impact	Couverture	Utilisé dans ou développée par
Water consumption (freshwater ecosystems)	France	(Damiani et al., 2019)
Cationic metal freshwater toxicity	Europe	(Dong et al., 2014)
Freshwater eutrophication from nitrogen	Only framework	(Dong et al., 2023)
Acidification ecosystem damage	Global	(Gade et al., 2021)
Groundwater scarcity	Only framework	(Gejl et al., 2018)
Biodiversity from climate change	Global FC, local impacts	(Iordan et al., 2023)
Aquatic biodiversity from zinc emissions	System boundary	(Karim et al., 2019)
Freshwater ecotoxicity	Global	(Kounina et al., 2019)
Marine biotic resource extraction	Global	(Langlois et al., 2014)
Land use	System boundary	(Lathuillière et al., 2017)
Aquatic biodiversity due to water temperature (climate change)	Global	(D. Li et al., 2022)
Water scarcity	Only framework	(Lin & Chiueh, 2021)
Land use	Only framework	(S. D. Maier et al., 2019)
Freshwater ecotoxicity	Only framework	(Marzullo et al., 2018)
Noise pollution	Only framework	(Meyer et al., 2019)
Soil organic carbon depletion	System boundary	(Morais et al., 2018)
Compaction and erosion of soil	Global	(Sonderegger et al., 2020)
Naturalness degradation potentials	Global	(Taelman et al., 2020)
SOC (soil organic carbon) depletion	Global	(Teixeira et al., 2018)
Impact of hydropower	North America	(Trottier, 2021; Turgeon et al., 2021)
Marine eutrophication	Global	(Vea et al., 2022)
Terrestrial ecotoxicity	Global	(Villanueva-Rey et al., 2019; Viveros Santos et al., 2018)
Impacts of plastic litter	Archétypes	(Corella-Puertas et al., 2023; Corella-Puertas et al., 2022)

3.4.3 Autres développements intéressants

L'état de la régionalisation entre différentes méthodes d'ÉICV varie. Particulièrement, Fabbri et al. (2023) intègrent les méthodes IMPACT World+ et ReCiPe 2016 pour améliorer leur capacité de calcul de scores d'impact spatialisés, en important des FC régionalisés là où ils ne sont pas déjà disponibles dans la base de données SimaPro. Cependant, Morais et al. (2016) ont observé que les praticiens ont souvent tendance à privilégier les méthodes d'ACV déjà présentes dans leur base de données plutôt que d'adopter les versions les plus récentes, ce qui entrave la spatialisation des impacts. Les impacts qui requièrent une régionalisation particulièrement importante incluent ceux liés à la disponibilité d'eau, à la qualité de l'eau et à l'utilisation des terres.

Le calcul des FC régionalisés implique l'utilisation de modèles mathématiques et de données qui ne sont pas toujours disponibles à une échelle suffisamment fine pour être pertinentes pour les catégories d'impacts nécessitant une résolution spatiale précise (Patouillard et al., 2015). Il convient de souligner que l'incertitude liée aux modèles d'ÉICV reste largement mal caractérisée à ce jour, à quelques exceptions près telles que la rareté de l'eau, l'acidification et le changement climatique. De plus, une source d'incertitude réside dans le fait que l'échelle de résolution native n'est pas toujours optimale, ne suivant pas le principe énoncé dans les méthodes d'ÉICV, selon lequel l'impact devrait être homogène à l'intérieur de chaque cellule à cette échelle de résolution (notamment dans le cas de IMPACT World+ (Bulle et al., 2019). Enfin, la variabilité spatiale représente une autre forme d'incertitude, manifeste lorsque l'on utilise un FC agrégé au lieu du FC natif. Cette dernière forme d'incertitude peut être calculée et est disponible pour l'ensemble des FC d'IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).

L'incertitude associée aux FC régionalisés est largement négligée dans la plupart des méthodes, malgré son importance cruciale pour une interprétation précise (Bos et al., 2020). Dans leur revue de littérature portant sur l'ACV des polluants atmosphériques non toxiques, Djomo et al. (2017) remarquent une grande variabilité dans les méthodes disponibles en termes d'échelle native. Bien que les classements généraux des pays soient largement cohérents entre les différentes méthodes, leur niveau d'incertitude rend inappropriée leur utilisation pour orienter les politiques environnementales. Concernant les impacts des émissions de zinc, Karim et al. (2019) notent une variabilité significative à une échelle fine. Ainsi, l'utilisation d'agrégations régionales plus larges ne semble pas altérer la représentativité par rapport à d'autres niveaux d'agrégation.

Selon la catégorie d'impact, renforcer la robustesse des FC présente des défis variables. Pour améliorer la robustesse des FC liés aux dommages d'acidification des écosystèmes, Gade et al. (2021) observent que la couverture d'un grand nombre d'espèces est plus cruciale que la représentation précise des espèces menacées ou endémiques. Ils suggèrent que, tout comme dans leur propre étude, l'utilisation d'ensembles de données géoréférencées sur les espèces pourrait également renforcer la robustesse des méthodes pour évaluer l'eutrophisation et l'utilisation des terres.

Certaines études récentes localisent parfois les processus à l'aide de coordonnées. Par exemple, Frost (2021) utilise des bibliothèques spatiales en R pour associer des FC de AWARE, à l'échelle des bassins versants à leurs processus principaux. Cependant, pour les processus électriques, les bassins versants n'ont pas été identifiés, en raison d'un manque de données sur l'utilisation précise de l'eau. SimaPro a été utilisé uniquement pour modéliser les processus individuels, dont les résultats ont ensuite été importés dans un script en R. En intégrant les données des processus modélisés dans SimaPro avec les coordonnées spatiales en R, cette méthode permet une évaluation plus précise et détaillée des impacts environnementaux. Elle fournit des analyses plus granulaires, offrant ainsi aux décideurs et aux régulateurs des informations locales spécifiques plutôt que des estimations globales.

Une dimension géographique récemment abordée dans le cadre de l'ACV est l'espace. Pour une ACV portant sur la technologie spatiale, comme les fusées, de nouvelles catégories d'impact sont nécessaires, ainsi que des définitions améliorées de ce qu'est l'espace, où il commence, et quels impacts terrestres s'appliquent aux émissions d'une fusée pendant son vol (Ko et al., 2017). Ainsi,

Loubet et al. (2020) ont développé un modèle de caractérisation pour évaluer les dommages associés aux émissions de débris dans l'ACV des systèmes spatiaux.

3.4.3.1 Spatialisation

Le rapport précédent soulignait que les FC régionalisés se limitent à décrire la portée potentielle des impacts des interventions environnementales, sans définir précisément les zones affectées (Patouillard et al., 2015), ce qui est décrit dans ce rapport comme la **spatialisation des impacts « destination »**. Une méthode pour remédier à cette lacune est d'utiliser des techniques SIG pour cartographier les impacts à partir des cartes et des équations initialement utilisées pour calculer les FC régionalisés (Iordan et al., 2023; D. Li et al., 2022).

Dans le même sens que Patouillard et al. (2015), M. Maier et al. (2017) discutent de la nécessité que les inventaires d'émissions de l'ACV soient résolus dans le temps et l'espace. Ils proposent une approche de calcul qui tient compte de la dispersion et transport des émissions en fonction de paramètres géographiques sur une carte raster. Les impacts sont ensuite calculés comme une somme sur la zone étudiée. Il est crucial de souligner que la compréhension de la dispersion et l'effet d'un contaminant depuis son point d'émission correspond à la **spatialisation des impacts « destination »**. En parallèle, l'intégration de cette information spatiale pour évaluer l'impact global d'une émission depuis un point précis constitue la **spatialisation des impacts « origine »**.

D'autre part, pour capturer la variabilité spatiale des impacts liés à l'utilisation de l'eau dans la production d'aliments pour animaux et de lait aux États-Unis, Henderson et al. (2017) distinguent les différents États ainsi que l'incertitude associée aux FC utilisés. Ils soulignent que, généralement, l'évaluation de l'incertitude des FC reste peu répandue. Liao (2022) calcule les résultats de l'ACV pour divers pays, utilisant cette diversité comme échantillon représentatif pour établir un portrait global de l'impact des pâtes à tartiner végétales et laitières sur le marché. Sa méthode intègre des estimations de densité par noyau pour modéliser les distributions de probabilité d'impact en fonction des pays et des types de pâtes à tartiner étudiés.

Dans le contexte du changement climatique, les FC demeurent uniformes quel que soit le lieu d'émission, mais les répercussions locales peuvent être suivies grâce aux acteurs d'impact locaux associés. Lin et Chiueh (2021) ont élaboré une méthode matricielle pour évaluer les conséquences de la pénurie d'eau, fondée sur les « zones affectées par le bassin versant » qui représentent les régions alimentées en eau par un bassin versant donné et qui sont donc influencées par son utilisation.

3.4.3.2 Avancées dans la spatialisation des impacts du changement climatique

Mouhoub et ses collègues, membres de l'équipe de développement de la méthode d'ÉICV IMPACT World+, apportent une contribution significative à l'évolution du domaine en créant des **FC régionalisés destination** pour spatialiser les impacts du changement climatique. Ces FC évaluent les effets à court et à long terme du changement climatique sur quatre problèmes de santé majeurs : les maladies cardiovasculaires, la diarrhée, la malnutrition et le paludisme. Structurés selon les six régions de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), ces FC intègrent également des ajustements préliminaires pour estimer les impacts au niveau des pays. En l'absence de données détaillées sur la charge de morbidité par pays en lien avec le changement climatique, la taille de la population a été utilisée comme indicateur approximatif.

Les résultats des évaluations des impacts à court et à long terme du changement climatique pour le modèle d'ACV de l'utilisation du shampoing ont été intégrés aux FC préliminaires pour la spatialisation de ces impacts. Bien que ces FC soient encore en phase expérimentale, leur inclusion dans ce rapport est justifiée. En effet, ces développements en cours et à venir sont cruciaux pour identifier les zones

géographiques susceptibles d'être affectées. Ils fournissent également aux décideurs les informations nécessaires pour élaborer des mesures d'adaptation adaptées, tout en soulignant que les stratégies de mitigation devraient demeurer une priorité.

La Figure 23 montre que, bien que le changement climatique soit un phénomène global et que la localisation des émissions n'influence pas directement les impacts, la **spatialisation impacts « destination »** permet d'identifier les pays ou les régions les plus vulnérables. Cette approche met en évidence les zones présentant une charge de morbidité accrue due aux émissions de gaz à effet de serre et aux élévations de température qui en résultent.

Impact of Climate Change short-term on Human Health (DALY) by destination country IMPACT World+ 2.0.1

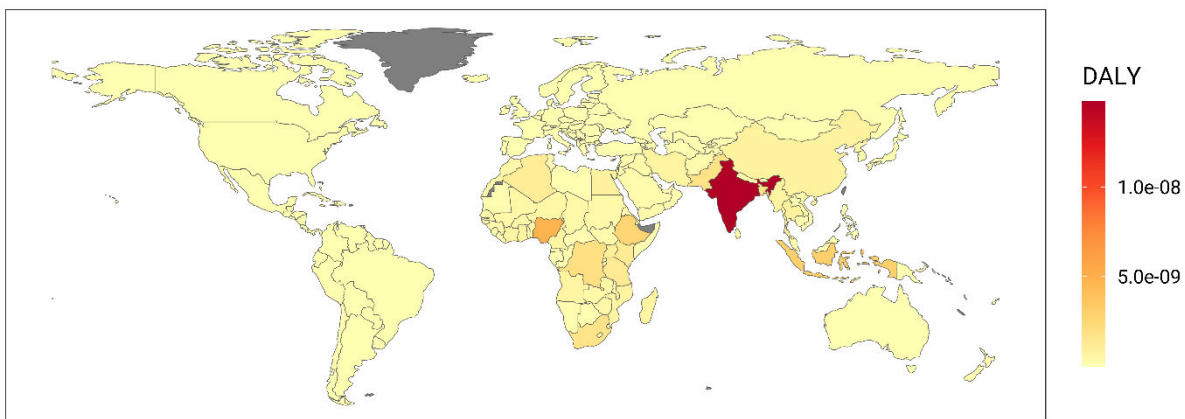


Figure 23. Spatialisation selon la destination des impacts du changement climatique court-terme sur la santé humaine (DALY) par pays, selon l'unité fonctionnelle : « Un lavage de cheveux effectué en France sur des cheveux de longueur moyenne ». Notre représentation basée sur les travaux de (Mouhoub & Bulle, 2024)

3.5 Opérationnalisation

3.5.1 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. Cette combinaison, a priori simple, ne l'est pas puisque les niveaux d'agrégation varient en fonction des catégories d'impact et la disponibilité d'ICV spatialisés varie en fonction des bases de données. De plus, l'intégration de ces deux éléments dans les logiciels d'ACV n'est pas toujours directe et des adaptations de la part des développeurs des logiciels sont toujours nécessaires.

Une question se pose aussi lors de l'opérationnalisation sur les échelles qui devraient être intégrées par défaut dans les logiciels. Une approche décrite dans le rapport précédent vise à simplifier la résolution spatiale pour réduire le nombre de FC résultants, en se basant sur leur similarité (Patouillard et al., 2015). Cette simplification est particulièrement pertinente lorsque l'on examine la méthode d'ÉICV LC-IMPACT, qui distingue trois dimensions d'incertitude pour déterminer l'échelle appropriée : l'incertitude contextuelle (la certitude avec laquelle il est possible d'évaluer les impacts), l'incertitude liée à la structure du modèle (le niveau de précision spatiale possible du modèle, compte tenu des connaissances actuelles) et l'incertitude des paramètres (si l'incertitude est étendue, comme pour l'ensemble de composés toxiques, il n'est pas nécessaire de détailler des régions) (Frischknecht & Jolliet, 2019).

En effet, l'utilisation de l'échelle la plus précise peut ne pas être toujours nécessaire pour obtenir des résultats adéquats, il est crucial de trouver un équilibre entre la résolution et la pertinence des FC. Les FC à haute résolution peuvent parfois fournir des détails superflus ou engendrer une surcharge

d'informations (Gejl et al., 2018; Lathuilière et al., 2017). Par exemple, même avec des résolutions élevées, les FC associés à l'utilisation des terres peuvent ne pas être en mesure de représenter de manière adéquate certaines parcelles de terres agricoles, rendant ainsi les archétypes plus pertinents dans ce contexte.

Il est donc possible de procéder à une spatialisation ciblée des flux qui contribuent vraiment à l'incertitude (selon la même approche itérative que l'on utilise généralement en ACV) à l'aide de techniques comme celles décrites à la section 3.3.2 et il n'est pas pour cela nécessaire de spatialiser l'ensemble de l'ICV et de l'ÉICV.

Le cas de l'acidification dans IMPACT World+ représente un exemple des enjeux d'opérationnalisation et de combinaison entre l'inventaire et les méthodes d'impact. La méthode, initialement régionalisée et spatialisée à une échelle native de 0.5 degré (Roy et al., 2014) a été ensuite agrégée au niveau du pays dans la méthode IMPACT World+. Or les bases de données telles qu'ecoinvent n'incluaient pas la spatialisation de ces flux jusqu'à récemment (Figure 24) ce qui représentait un problème d'opérationnalisation. L'inclusion de la spatialisation des flux lors de l'intégration d'ecoinvent dans les logiciels a résolu le problème, mais a alors créé une incompatibilité avec toutes les méthodes non régionalisées, qui devraient inclure aussi ces flux dans le calcul des impacts, ce qui n'est pas toujours le cas (Figure 25). Dans cet exemple, en utilisant l'indicateur *Terrestrial Acidification* dans le logiciel openLCA, le flux de dioxyde de soufre du processus de production d'électricité ne sera pas caractérisé lors de l'utilisation de la méthode ReCiPe 2016.

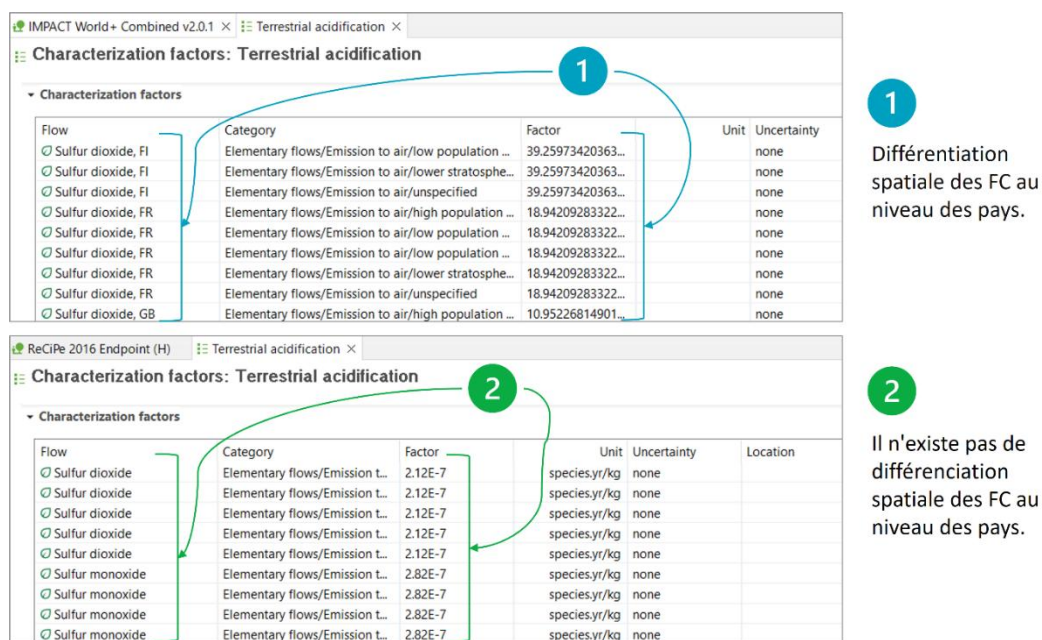


Figure 24 : FC régionalisés dans IMPACT World+ (haut) et ReCiPe 2016 (H) (bas) pour openLCA.

Inputs/Outputs: electricity production, lignite | electricity, high voltage | Cutoff, U - IT

Inputs

Flow	Category	Amou...	Unit	Costs/...	Uncer...	Avoid...	Provid...	D.
lignite	052:Mining of lignit...	1.110...	kg		logno...		ma...	(3)
lignite power plant	422:Construction of ...	1.000...	Item(s)		logno...		lig...	(5)

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/R...	Uncerta...	Avoide...
Sulfur dioxide, IT	Emission to air/high populati...	0.00556	kg		none	
Thorium-228	Emission to air/low populatio...	7.23112E-6	kBq		lognor...	
Thorium-232	Emission to air/low populatio...	1.14121E-5	kBq		lognor...	
Toluene	Emission to air/low populatio...	1.13084E-6	kg		lognor...	

Spatialisation d'un flux de dioxyde de soufre

Figure 25 : Spatialisation des flux élémentaires liés à l'acidification pour un processus de la base de donnéesecoinvent.

Les logiciels d'ACV mettent en œuvre la spatialisation des impacts de deux manières distinctes : 1) en se basant sur la spatialisation des flux élémentaires ; ou 2) en s'appuyant sur une analyse géospatiale. En particulier, l'approche de spatialisation des flux élémentaires est adoptée par des logiciels tels que SimaPro, LCA for Expert et openLCA. Dans cette approche, l'ACV régionalisée est réalisée en établissant un lien entre les flux élémentaires comportant une étiquette de la région géographique, généralement au niveau national ou pour un archétype spécifique, et en les multipliant par le FC correspondant. Cependant, le principal défi de cette approche réside dans la difficulté à prendre en compte la variabilité spatiale à l'intérieur d'un pays (Figure 26 dans le cas de la rareté d'eau). Une revue des différents logiciels ACV est présentée à la section 3.5.2.

Si nous prenons en considération deux parcelles fictives, l'une située dans la vallée de Napa en Californie et l'autre dans le Vermont aux États-Unis, et que nous cherchons à évaluer les impacts associés au prélèvement de la ressource en eau, la Figure 26 montre que le FC régionalisé pour les États-Unis sous-estime légèrement les impacts pour la parcelle en Californie (d'environ 5%). En revanche, les impacts liés à l'eau prélevée au Vermont sont largement surestimés, de plus de 40 fois, lorsque le FC agrégé pour les États-Unis est utilisé. Ainsi, dans un logiciel utilisant une approche de régionalisation basée sur la spatialisation des flux élémentaires, il est impossible de prendre en compte ces différences significatives résultant de la variabilité de la catégorie d'impact (Figure 26) à moins d'avoir un inventaire spatialisé à l'échelle native de tous les FC régionalisés, mais ceci entraverait l'opérationnalisation des bases de données puisque chaque méthode d'ÉICV et chaque catégorie demanderaient une échelle native différente.

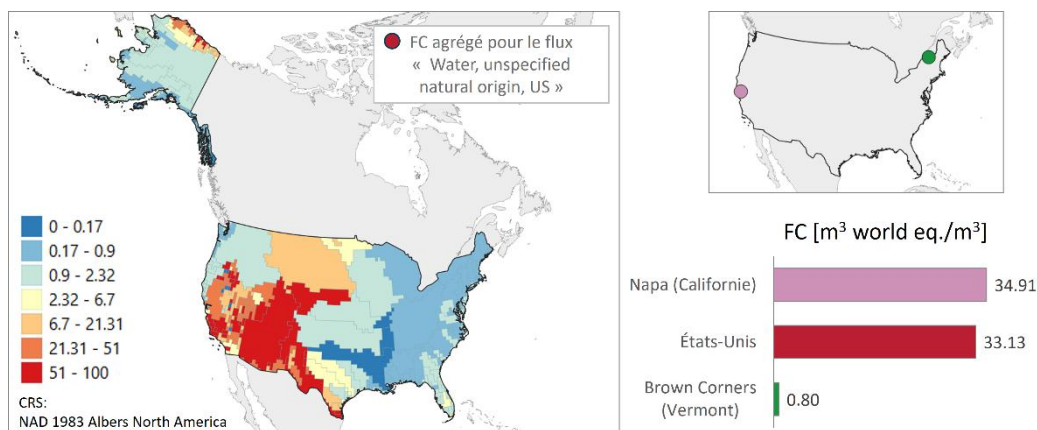


Figure 26. FC pour l'évaluation de la rareté d'eau [m^3 world eq./ m^3 consommées dans la région i]. Moyenne arithmétique sur douze mois. La figure présente un zoom sur les États-Unis (panneau à gauche), basée sur Boulay et al. (2018) et localise deux parcelles fictives : l'une à Napa, Californie, et l'autre à Brown Corners, Vermont (panneau en haut à droite). Les FC pour ces parcelles sont déterminés par l'intersection spatiales avec la couche de FC de la méthode AWARE et sont comparés au FC agrégé pour l'ensemble des États-Unis (panneau en bas à droite).

Pour surmonter les limites de l'approche de spatialisation des impacts basée sur la spatialisation des flux élémentaires, des efforts ont été déployés, notamment en intégrant des analyses géospatiales. En particulier, Brightway et openLCA offrent cette possibilité, où les flux élémentaires héritent de la localisation du processus auquel ils appartiennent (sous forme de vecteurs), ce qui réduit le temps nécessaire à la spatialisation de l'ensemble des flux élémentaires d'un processus donné (section 3.5.2). Des formats spécifiques de données peuvent être utilisés pour faciliter la définition des régions, et les importer ensuite dans un logiciel. openLCA recommande par exemple l'utilisation de *geoJSON.io* (<https://geoJSON.io>)

Malgré les avantages de l'approche de spatialisation des impacts par analyse géospatiale, il est important de noter qu'il est nécessaire que le praticien effectue des opérations supplémentaires pour lier les flux élémentaires aux régions définies pour le modèle ACV (création de nouvelles géographies, attribution des géographies aux processus, calcul des FC régionalisés agrégés pour ces nouvelles géographies). De plus, et probablement le point le plus crucial, le logiciel openLCA calcule actuellement des FC régionalisés agrégés en utilisant une pondération par surface. Cette approche ne garantit pas que les FC soient conformes aux recommandations de la méthode d'impact. Par exemple, la méthode IMPACT World+ calcule des FC agrégés pour la rareté de l'eau en se basant sur la consommation d'eau, approche qui est d'ailleurs recommandée par GLAM.

Pour illustrer une approche de spatialisation des impacts dans un logiciel d'ACV, prenons l'exemple de la production de raisins en France, qui nécessite une irrigation en raison de l'impact du changement climatique. Lorsque l'approche géospatiale d'openLCA est utilisée, le logiciel obtient un FC pour la France qui est environ un tiers de celui recommandé par les développeurs de la méthode d'ÉICV (IMPACT World+) (Figure 27). Dans ce cas, le calcul géospatial dans le logiciel openLCA sous-estime donc les impacts. Le point crucial ici est qu'il serait nécessaire que les logiciels suivent les approches utilisées par les méthodes d'ÉICV (comme IMPACT World+ ou LC-IMPACT) pour agréger les FC afin d'assurer la cohérence dans ce type de calculs.

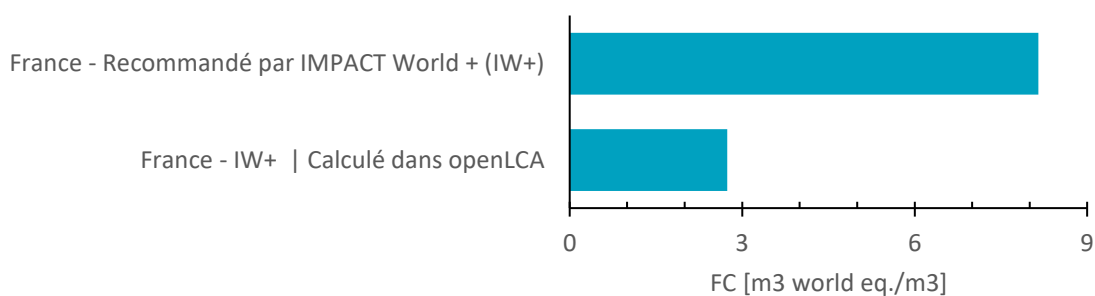


Figure 27. FC pour évaluer la rareté d'eau associée au flux « Water, FR » dans openLCA, utilisant la méthode d'ÉICV IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).

Un autre exemple d'inadéquation des résolutions entre l'ICV et l'ÉICV correspond aux activités qui ont lieu en milieu marin. Les compartiments d'émission et les FC disponibles dans les bases de données d'ACV et dans les logiciels peuvent ne pas convenir aux activités maritimes, car la modélisation est souvent centrée sur la terre (Jacquet et al., 2024).

Un autre enjeu lié à l'opérationnalisation est le partage de données entre praticiens et l'interopérabilité des bases de données. En effet, tel que souligné par Mutel et al. (2019), l'adoption d'un format universel

et l'harmonisation de la nomenclature restent deux des enjeux à résoudre de la part des développeurs de BD, de méthodes et de logiciels.

3.5.2 Revue des logiciels et outils

3.5.2.1 Logiciels ACV

Les logiciels d'ACV, qu'ils soient propriétaires ou libres, présentent des caractéristiques distinctes et variées en matière de fonctionnalités, de disponibilité des bases de données et d'ergonomie. De plus, ils offrent différents niveaux de gestion des inventaires et des méthodes d'ÉICV, ce qui influence le degré de régionalisation et spatialisation pouvant être pris en compte dans une ACV selon le logiciel utilisé. Cette section se concentre sur les logiciels SimaPro, LCA for experts (GaBi), Brightway et openLCA pour évaluer le niveau de différenciation spatiale qu'ils offrent actuellement. Le Tableau 12 répertorie les versions des logiciels utilisés pour élaborer cette section. Ainsi, les descriptions des logiciels que nous présentons peuvent ne pas correspondre nécessairement à celles rencontrées dans d'autres versions de ces logiciels.

Patouillard et al. (2015) énumèrent trois approches pour indiquer un attribut spatial : la description d'un archétype pertinent, l'inclusion d'informations géographiques en format textuel (par exemple, le nom d'un pays), et l'ajout de données géographiques sous forme de coordonnées ou de vecteurs. Les deux derniers représentent les deux techniques utilisées par les logiciels actuels pour intégrer l'information spatiale des flux élémentaires et les connecter avec les FC régionalisés.

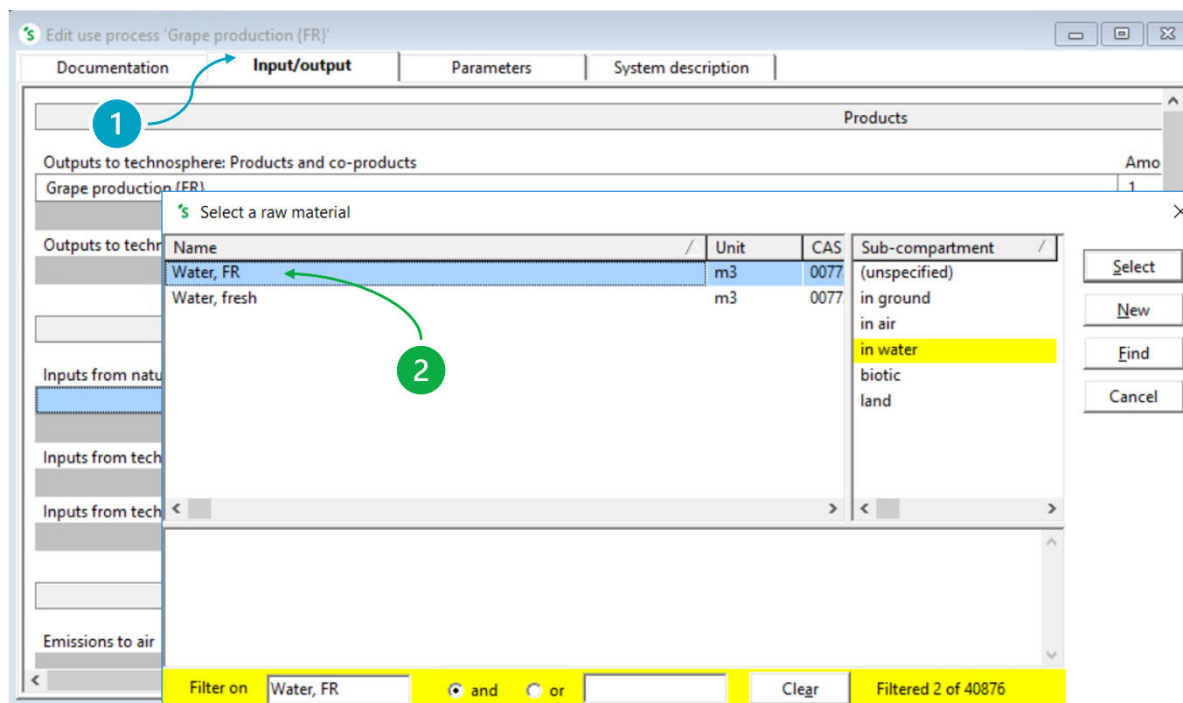
Tableau 12. Version des logiciels qui ont été utilisés dans cette section

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Éditeur	PRé Sustainability	Sphera	Brightway Developers	GreenDelta
Lien vers le logiciel	https://simapro.com/	https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/	https://docs.brightway.dev/en/latest/index.html	https://www.openlca.org/
Version	9.5.01	<i>Non disponible. Un membre de ScoreLCA nous a fait la démonstration de ce logiciel, que nous ne possédons pas.</i>	bw2analyzer (0.10) bw2calc (1.8.2) bw2data (3.6.6) bW2io (0.8.10) bw2parameters (1.1.0) bw_migrations (0.2)	2.1.1

3.5.2.1.1 SimaPro

Dans le logiciel SimaPro®, l'ACV régionalisée est mise en œuvre de manière relativement simple. Le logiciel (version bureau) ne dispose pas d'un champ spécifique pour les informations géographiques, qui sont simplement intégrées dans le nom d'un flux élémentaire ou d'un processus élémentaire. Ainsi, SimaPro® adopte une approche de calcul de scores d'impact spatialisés telle que décrite ci-dessous :

- Les flux élémentaires sont dupliqués, avec des noms incluant des indications géographiques telles que le code ISO d'un pays. Par exemple, la Figure 28 présente un flux d'eau prélevée en France (FR).
- Les bases de données des méthodes d'ÉICV contiennent des FC régionalisés agrégés pour chaque flux élémentaire, avec un certain degré de régionalisation. Les utilisateurs sont donc limités à l'utilisation de régions préétablies. Par exemple, la Figure 29 illustre le FC pour évaluer la catégorie d'impact *Water scarcity* au niveau des problèmes pour le flux élémentaire « Water, FR » selon la méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).
- Enfin, l'ACV régionalisée est faite en combinant l'inventaire spatialisé avec les FC régionalisés. Les informations géographiques associées au nom d'un processus élémentaire (point 1 dans la Figure 28) ne sont donc pas utilisées dans l'ACV régionalisée.
- La spatialisation des impacts « origine » est réalisable pour les catégories d'impact globales et régionales (indiquées en gris sur la Figure 10). Seules les catégories d'impacts de portée locale où l'origine coïncide avec la destination permettent le calcul des impacts « destination » (représentées en mauve sur la Figure 10).



1 **Grape production {FR}**
Le nom du processus élémentaire peut intégrer des données géographiques.

2 **Water, FR**
Flux élémentaire spatialisé

Figure 28. Exemple du flux d'élémentaire « Water, FR » du processus *Grape production {FR}* dans SimaPro®.

Compartment	Subcompartment	Substance /	CAS number	Factor	Unit
Water	lake	Water, FO	007732-18-5	-1.4392618900696959	m3 world-eq / m3
Water	ocean	Water, FO	007732-18-5	0	m3 world-eq / m3
Water	river	Water, FO	007732-18-5	-1.4392618900696959	m3 world-eq / m3
Raw		Water, FR	007732-18-5	8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Raw	in ground	Water, FR	007732-18-5	8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Raw	in water	Water, FR	007732-18-5	8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Water		Water, FR	007732-18-5	-8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Water	groundwater	Water, FR	007732-18-5	-8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Water	groundwater, long-term	Water, FR	007732-18-5	-8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Water	lake	Water, FR	007732-18-5	-8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Water	ocean	Water, FR	007732-18-5	0	m3 world-eq / m3
Water	river	Water, FR	007732-18-5	-8.150621234141653	m3 world-eq / m3
Raw		Water, GA	007732-18-5	0.4430631327832625	m3 world-eq / m3

1 Water, FR

Le nom du flux élémentaire intègre des données géographiques.

IMPACT World+ 2.0.1

Catégorie d'impact: *Water scarcity*
Unités: m³ world-eq

Figure 29. Exemple du FC pour évaluer la rareté d'eau associée au flux d'eau dans SimaPro®.

La version en ligne de SimaPro® (*Simapro Flow*) adopte, tout comme la version bureau (*desktop*), une approche de spatialisation des impacts basée sur la spatialisation des flux élémentaires. Toutefois, il convient de noter quelques différences par rapport à ce qui a été décrit précédemment pour SimaPro® *desktop* :

- Les flux élémentaires ne sont pas dupliqués, car leurs noms n'incluent pas d'indications géographiques. Un champ dédié permet de sélectionner le pays ou la région d'un flux élémentaire. Par exemple, la Figure 30 illustre un flux d'eau prélevée en France.
- Les bases de données des méthodes d'ÉICV contiennent des FC agrégés pour chaque flux élémentaire, avec un certain niveau de régionalisation. Les utilisateurs restent encore une fois, limités à l'utilisation de régions préétablies. Par exemple, la Figure 31 montre les FC pour évaluer la catégorie d'impact *Water scarcity* au niveau des problèmes pour le flux élémentaire « *Water* » selon la méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).
- Par défaut, le logiciel ne prendra pas en compte ces informations spatiales. L'ACV régionalisée, combinant l'inventaire spatialisé avec les FC régionalisés, n'est calculée qu'à condition de cocher les cases *Regionalized results* et *Detailed analysis* (Figure 32).

The screenshot shows the SimaPro Flow interface. On the left is a navigation menu with options like Projects, New Flow..., Canvas, Parameters, Calculations, and Processes. The main area displays 'Input elementary flows' with a table:

Substance	Amount	Unit	Compartment	Subcompartment	Geography
Water, unspecified natural origin/m3	1	m3	Raw ma...	in water	France

Below the table, a blue box labeled '1' contains the text: 'Zone de spécification pour la spatialisation du flux élémentaire.'

Figure 30. Exemple du flux élémentaire « *Water, FR* » du processus « *Grape production {FR}* » dans SimaPro Flow®.

SímaPro

Water pollutants (Ecological Scarcity 20... | UBP | 1.00.1

Edit impact category Water scarcity

Water/m3	Afghanistan	Waterborne emis...	(unspecified)	-57.9	m3
Water/m3	Western Electricit...	Waterborne emis...	(unspecified)	-33.1	m3
Water/m3	Kyrgyzstan	Waterborne emis...	(unspecified)	-63	m3
Water/m3	Asia	Waterborne emis...	(unspecified)	-42.2	m3
Water/m3	Virgin Islands, Brit...	Waterborne emis...	(unspecified)	-14.6	m3
Water/m3	Martinique	Waterborne emis...	(unspecified)	-14.7	m3
Water/m3	Tonga	Waterborne emis...	(unspecified)	-12.7	m3
Water/m3	Prince Edward Isl...	Waterborne emis...	(unspecified)	-1.71	m3
Water/m3	Italy	Waterborne emis...	(unspecified)	-43.2	m3
Water/m3	Brazil, South-east...	Waterborne emis...	(unspecified)	-2.28	m3

1 Water

L'information géographique n'est pas incluse dans le nom du flux élémentaire, puisqu'il existe un champ dédié à sa spécification.

IMPACT World+ Midpoint 1.03

Catégorie d'impact: *Water scarcity*
Unités: m³ world-eq

Figure 31. Exemple du FC pour évaluer la rareté d'eau pour caractériser le flux d'eau dans SímaPro Flow®.

Calculation setup

Basic setup

Top Process

Product

Amount

Unit

Method
 IMPACT World+ Midpoint **1.03**

Advanced options

- Detailed analysis
- Regionalized results
- Results per tier

1 Résultats régionalisés

Pour calculer des ACV régionalisées, il est indispensable de sélectionner ces options.

Figure 32. Pour obtenir des résultats d'impacts spatialisés dans le calcul d'ACV, il est nécessaire de sélectionner à la fois l'analyse détaillée et les résultats régionalisés dans la configuration de calcul.

3.5.2.1.2 LCA for Experts (GaBi)

Dans le logiciel LCA for Experts, plus connu sous son ancien nom de GaBi, l'ACV régionalisée n'est intégrée que pour les catégories d'impact d'utilisation de l'eau et des terres (Sphera, 2021). Une approche de spatialisation des impacts basée sur la spatialisation des flux élémentaires y est aussi adoptée :

- Les noms des flux élémentaires, notamment ceux relatifs à l'eau, comportent des codes permettant de spécifier la localisation d'un prélèvement ou de l'émission d'eau. Cela implique l'existence de plusieurs copies des flux élémentaires dans la base de données du logiciel, la seule différence étant la région géographique (Figure 33 et Figure 34). Les flux sont disponibles pour plus de 60 pays, sélectionnés en fonction de leur importance économique et de leur représentation dans la base de données de GaBi. Les 28 pays de l'UE sont tous inclus, conformément aux directives méthodologiques de l'EF.
- GaBi intègre des FC régionalisés issus des méthodes WSI, AWARE et WAVE+, qui sont utilisées pour régionaliser les impacts liés à la consommation d'eau.

Les bases de données de GaBi proposent environ 14 000 ensembles de données de processus élémentaires. Bien qu'il n'ait pas été possible d'intégrer des flux régionalisés dans chaque ensemble de données disponible, les développeurs de la base de données ont concentré leurs efforts sur les processus identifiés comme les principaux contributeurs à la consommation d'eau dans la majorité des systèmes de produits, notamment l'énergie et les produits agricoles (Figure 35) (Sphera, 2022).

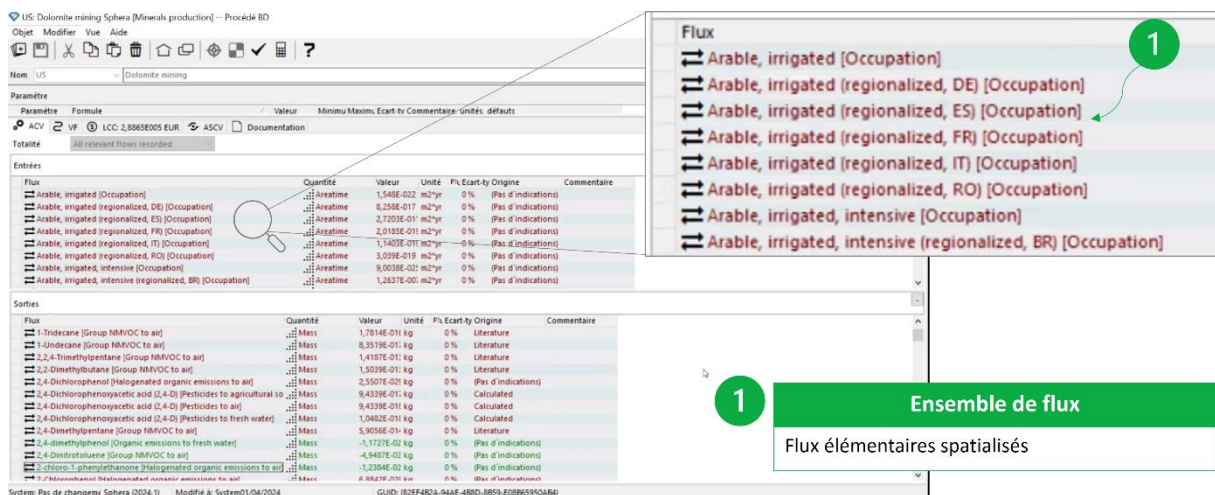


Figure 33. Exemple de flux élémentaires spatialisés dans un processus dans le logiciel LCA for experts (GaBi)

Flow name	Explanation
Fresh water, regionalized, AR	Fresh water use in Argentina
Fresh water, regionalized, AT	Fresh water use in Austria
Fresh water, regionalized, AU	Fresh water use in Australia
...	etc.

Figure 34. Exemple des copies de flux d'eau dans LCA for experts (GaBi).

Nom	Unité	Flux	Unité	Impact	Impact
Permanent crops, irrigated (regionalized, TH) [Occ	[Occ	0,0078107	m ² *yr	128,03	0 %
Permanent crops, irrigated (regionalized, SL) [Occ	[Occ	0,005636	m ² *yr	177,43	0 %
Permanent crops, irrigated (regionalized, SK) [Occ	[Occ	0,010208	m ² *yr	97,966	0 %
Permanent crops, irrigated (regionalized, SI) [Occ	[Occ	0,0088605	m ² *yr	112,86	0 %
Permanent crops, irrigated (regionalized, UZ) [Occ	[Occ	0,021967	m ² *yr	45,522	0 %
Permanent crops, irrigated (regionalized, US) [Occ	[Occ	0,016289	m ² *yr	61,391	0 %
Permanent crops, irrigated (regionalized, UA) [Occ	[Occ	0,029044	m ² *yr	34,43	0 %
Permanent crops, irrigated (regionalized, TR) [Occ	[Occ	0,07149	m ² *yr	13,988	0 %

Nom	Unité	Flux	Unité	Impact	Impact
Water, FR					

Le nom du flux élémentaire intègre des données géographiques.

Figure 35. Intégration de FC régionalisés pour l'occupation de terres de la méthode EF 3.1 dans LCA for experts (GaBi).

3.5.2.1.3 Brightway

Brightway est un cadre open source permettant de réaliser des calculs d'ACV en utilisant Python (Mutel, 2017). Cette librairie s'est avérée particulièrement utile pour les calculs d'ACV dynamiques et les analyses d'incertitude de type Monte Carlo. Bien que Brightway offre une vitesse de calcul appréciable, son utilisation requiert des compétences en programmation. Ainsi, l'Activity-Browser propose une interface utilisateur graphique (GUI) pour Brightway. Cette interface simplifie les tâches habituelles telles que la gestion de projets et de bases de données, la modélisation des ICV, ainsi que l'analyse des résultats ACV, les rendant ainsi plus intuitives et conviviales (Steubing et al., 2020).

À l'origine, Brightway ne permet pas la réalisation d'une ACV régionalisée en utilisant une approche basée sur la spatialisation des flux élémentaires. Par exemple, comme le montre la Figure 36, des informations géographiques ne sont pas associées aux flux élémentaires, même si la localisation du processus élémentaire peut être spécifiée. Cependant, la version 2.0.1 de la méthode IMPACT World+ compatible avec Brightway (Agez et al., 2023) a introduit la spatialisation des flux d'eau à la fois dans la base de données ecoinvent et la méthode d'impact à travers ce logiciel, simplifiant ainsi la spatialisation des impacts liés à la rareté de l'eau à l'échelle nationale, en accord avec d'autres logiciels examinés dans cette section. De plus, la librairie Python Regioinvent (Agez, 2024) permet non seulement de spatialiser les flux d'eau, mais également ceux liés aux terres ainsi qu'aux impacts d'acidification et d'eutrophisation. La Figure 37 illustre la possibilité de spatialiser les flux d'eau lors de l'utilisation d'IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).

Welcome LCA Setup Activity Details Parameters

Grape production ✖

Edit Activity Description Uncertainty Comments

Name: Grape production

Location: FR

Database: ScoreLCA_Spatialisation

Products:

Amount	Unit	Product	Formula
0 1	kilogram	Grape production	

Technosphere Flows:

Biosphere Flows:

Amount	Unit	Flow Name	Compartments	Database	Formula
0 1	cubic meter	Water, unspecified natural origin	natural resource - in water	biosphere3	

Downstream Consumers:

1 Grape production

Il est possible de spécifier la localisation du processus élémentaire dans un champ dédié

2 Water

Le nom du flux élémentaire n'intègre pas des données géographiques.

Figure 36. Exemple du flux d'élémentaire « Water » du processus « Grape production » dans Activity-Browser.

Welcome Characterization Factors LCA Setup Parameters

IMPACT Wor.. ✖

Method: IMPACT World+ Midpoint 2.0.1_regionalized - Midpoint - Water scarcity

Hide uncertainty columns Edit Characterization Factors

	Name	Category	Amount	Unit	Uncertainty
1953	Water, unspecified natural origin, FI	('natural resource', 'in ground')	1.6723	cubic meter	Undefined or ...
1954	Water, unspecified natural origin, FR	('natural resource', 'in water')	8.1506	cubic meter	Undefined or ...
1955	Water, unspecified natural origin, FR	('natural resource', 'in ground')	8.1506	cubic meter	Undefined or ...
1956	Water, unspecified natural origin, GB	('natural resource', 'in water')	1.6122	cubic meter	Undefined or ...
1957	Water, unspecified natural origin, GB	('natural resource', 'in ground')	1.6122	cubic meter	Undefined or ...
1958	Water, unspecified natural origin, GH	('natural resource', 'in water')	16.438	cubic meter	Undefined or ...
1959	Water, unspecified natural origin, GH	('natural resource', 'in ground')	16.438	cubic meter	Undefined or ...
1960	Water, unspecified natural origin, GLO	('natural resource', 'in water')	42.954	cubic meter	Undefined or ...
1961	Water, unspecified natural origin, GLO	('natural resource', 'in ground')	42.954	cubic meter	Undefined or ...
1962	Water, unspecified natural origin, GR	('natural resource', 'in water')	68.036	cubic meter	Undefined or ...

1 Water

Le nom du flux élémentaire intègre des données géographiques.

Figure 37. Exemple du flux d'élémentaire « Water, FR » du processus « Grape production » dans Activity-Browser. La spatialisation des flux d'eau est intégrée à la méthode IMPACT World+ v2.0.1.

La réalisation des ACV régionalisées selon une approche géospatiale suivant le cadre de calcul de Brightway requiert en complément la librairie Python bw2regional. Cette librairie utilise *pandarus* dans

les calculs des intersections entre l'inventaire et les FC régionalisés natifs (Mutel, 2014). La Figure 38 présente la configuration minimale requise, ainsi qu'un exemple de calcul géospatial pour évaluer les impacts sur l'eau de la production de coton. Des exemples d'application de la librairie `bw2regional` sont disponibles sur GitHub : <https://github.com/cmutel/regionalized-lca-examples>.

```
1 import brightway2 as bw
2 import bw2regional as bwr
3 import pandas as pd
4 import os
```

1 Libraires nécessaires pour le calcul géospatial avec Brightway.

```
1 lca = bwr.ExtensionTablesLCA(
2     {'production mixes', 'Cotton': 1},
3     method=('irrigation water', 'surface', 'grid scale'),
4     xtable="blue water consumption"
5 )
6 lca.lci()
7 lca.lcia()
8 lca.score
```

2 Exemple de calcul géospatial avec Brightway et bw2regional.

Figure 38. ACV régionalisée dans Brightway avec la librairie `bw2regional`.

3.5.2.1.4 openLCA

Le logiciel openLCA propose deux approches pour réaliser des ACV régionalisées :

- Approche basée sur la spatialisation des flux élémentaires.
- Approche géospatiale.

Dans openLCA, le calcul d'impact spatialisé selon l'approche par spatialisation des flux élémentaires est similaire à celle de SimaPro :

- Les flux élémentaires sont associés à une localisation géographique, ce qui permet aux praticiens en ACV de choisir le flux élémentaire correspondant à la localisation du processus. La Figure 39 illustre l'ajout d'un flux d'eau prélevée en France (« *Water, FR* »), avec les compartiments et sous-compartiments indiqués dans l'arborescence de la fenêtre de sélection des flux élémentaires.
- Les méthodes d'impact, avec une certaine résolution spatiale, contiennent des FC régionalisés généralement à l'échelle d'un pays (code ISO). La Figure 40 présente, à titre d'exemple, les FC pour l'évaluation de la rareté de l'eau selon la méthode IMPACT World+ (Bulle et al., 2019).

1 Grape production - FR
De l'information géographique fait partie du nom du processus élémentaire.

2 Water, FR
De l'information géographique fait partie du nom du flux élémentaire.

Figure 39. Exemple du flux d'élémentaire « Water, FR » du processus « Grape production – FR » dans openLCA

1 Water, FR
De l'information géographique fait partie du nom du processus élémentaire.

IMPACT World+ 2.0.1
Catégorie d'impact: *Water scarcity*
Unités: m³ world-eq

Flow	Category	Factor	Unit	Uncertainty
Water, unspecified natural origin, FO	Elementary flows/Resource/in ground	1.4392618900696958		none
Water, unspecified natural origin, FO	Elementary flows/Resource/in water	1.4392618900696958		none
Water, unspecified natural origin, FO	Elementary flows/Resource/unspecified	1.4392618900696958		none
Water, unspecified natural origin, FR	Elementary flows/Resource/in ground	8.150621234141653		none
Water, unspecified natural origin, FR	Elementary flows/Resource/in water	8.150621234141653		none
Water, unspecified natural origin, FR	Elementary flows/Resource/unspecified	8.150621234141653		none
Water, unspecified natural origin, GA	Elementary flows/Resource/in ground	0.4430631327832625		none
Water, unspecified natural origin, GA	Elementary flows/Resource/in water	0.4430631327832625		none

Figure 40. Détail du FC pour évaluer la rareté d'eau (*Water scarcity*) pour caractériser le flux « Water, FR » dans openLCA.

Dans openLCA, l'approche géospatiale pour mener des ACV régionalisées comprend les étapes suivantes :

- Les processus élémentaires doivent inclure une localisation, telle que le code ISO d'un pays, par exemple (Figure 39). Cette localisation doit avoir une géométrie associée pour que le calcul régionalisé puisse la considérer complètement. Dans les cas où ces formes sont manquantes, notamment pour les géographies génériques telles que GLO ou ROW, les résultats présentés sous forme de carte (tant d'inventaire que d'impact) ne sont pas affichés (mais la contribution au score total d'impact associé à ces régions l'est).

- Pour régionaliser une catégorie d'impact dans openLCA, il est nécessaire d'importer des FC régionalisés en format *GeoJSON*. Bien qu'openLCA ne puisse actuellement pas stocker les paramètres *GeoJSON* et les associations de flux élémentaires comme montré dans la Figure 41 (à chaque ouverture de la catégorie d'impact cet onglet apparaît vide), il est possible de sauvegarder et d'exporter une configuration donnée pour le télécharger à chaque fois que l'on veut calculer des nouveaux FC agrégés. De plus, openLCA peut afficher la carte des FC régionalisés qui ont été importés dans le logiciel (Figure 42).
- La dernière étape pour configurer la méthode d'ÉICV régionalisée consiste à associer les localisations des processus aux unités spatiales des méthodes d'ÉICV. Cela permet au logiciel de calculer des FC agrégés spécifiques pour les emplacements sélectionnés par l'utilisateur en croisant les entités du fichier *GeoJSON* avec les géométries des processus (Figure 43).

1

Regionalized calculation: Water scarcity

Setup

GeoJSON or setup file: C:\Users\jvive\Documents\ciraig\21_spatialisation\data\impact_world\WaterScarcityMidpoint_native\setup.json

Open Save Validate

GeoJSON Parameters

Parameter	Identifier	Default value	Range	Aggregation type
BAS34S_ID	✱ bas34s_id	3.01536E4	[1.00000, 6.68960E4]	Weighted average
cf_water	✱ cf_water	20.06592	[0.00000, 100.00000]	Weighted average

Flow bindings

Flow	Category	Formula	Default value	Unit
Water, unspecified nat...	Elementary flows/Res...	cf_water	20.06592	m3

General information | Characterization factors | Parameters | Regionalized calculation | Similarities

1 Importation d'un fichier GeoJSON de FC

Catégories d'impact > Sélectionner une catégorie d'impact > Calcul régionalisé

2 Association des FC régionalisés (fichiers GeoJSON) aux flux

Pour calculer des FC régionalisés, il faut relier les flux aux fichiers GeoJSON

Figure 41. Importation de FC régionalisés sous forme de fichier *GeoJSON*.

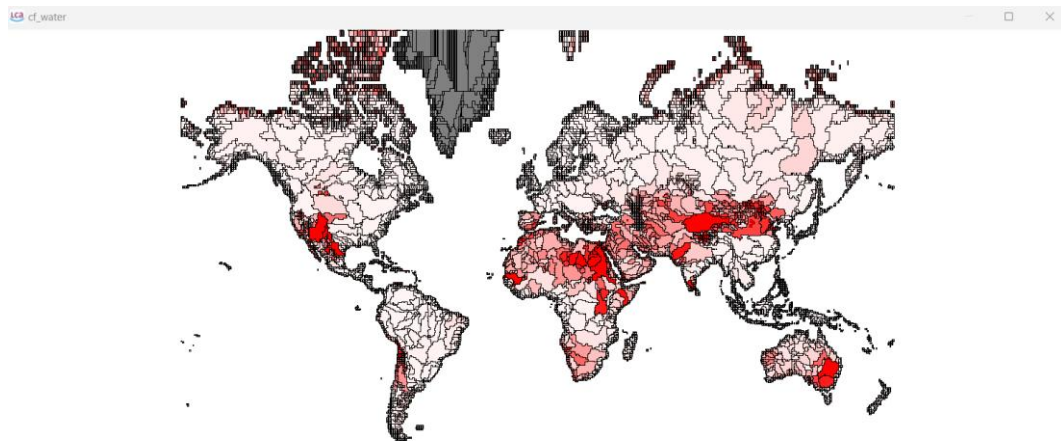


Figure 42. FC pour évaluer la rareté d'eau (Water scarcity) pour caractériser le flux « Water, FR » importés dans openLCA.

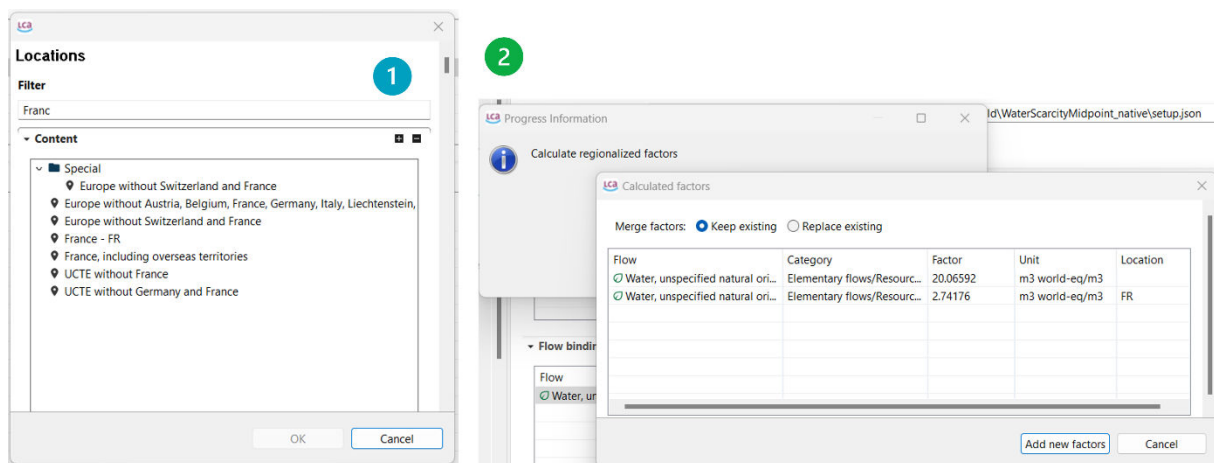


Figure 43. Calcul des FC agrégés pour les régions sélectionnées.

Dans le cas de l'approche géospatiale, il convient de noter que le logiciel openLCA calcule des FC agrégés pour toute résolution spatiale en utilisant une moyenne pondérée par la surface, ce qui n'est pas cohérent avec les choix faits lors du développement de plusieurs méthodes d'ÉICV, comme IMPACT World+. Il est également possible d'utiliser les valeurs moyennes, minimales ou maximales des FC régionalisés pour une région donnée. Dans le cas de la méthode AWARE telle que publiée initialement par ses auteurs, les FC moyens annuels par pays et par type d'utilisation agricole correspondent à des moyennes pondérées de la consommation d'eau au niveau du bassin versant. Par conséquent, ces approches d'agrégation se traduisent en de valeurs différentes de FC pour une même région (Figure 27).

3.5.2.1.5 Bilan

Le Tableau 12 présente un résumé des principales caractéristiques d'analyse spatiale des logiciels ACV discutés dans cette section. En 2018, lors du 69e forum de discussion sur l'ACV à Zurich, les développeurs des logiciels ACV ont souligné que la non-correspondance spatiale entre les données d'inventaire et les méthodes d'ÉICV entrave la prise en compte de la dimension spatiale dans la réalisation des ACV. En outre, il a été reconnu que le calcul d'impact spatialisé basé sur la spatialisation des flux élémentaires donne lieu à une explosion du nombre de flux élémentaires et de FC afin de garantir la correspondance entre la résolution spatiale de l'ICV et les méthodes d'ÉICV régionalisées (Frischknecht et al., 2019). En outre, l'approche de spatialisation des impacts par analyse géospatiale s'avère pertinente pour pallier cette contrainte quant au nombre de flux élémentaires et de FC, à

condition de considérer des agrégations de FC alignées avec les méthodes d'ÉICV, notamment en fonction de l'émission ou le prélèvement de flux élémentaires. Néanmoins, les logiciels ACV ont peu évolués depuis 2018 pour fournir de réelles améliorations face à cet enjeu.

Tableau 13. Résumé des caractéristiques des logiciels ACV abordés dans cette section.

Attribut / Logiciel	SimaPro	LCA for Experts (GaBi)	Brightway	openLCA
Licence	Propriétaire	Propriétaire	BSD	MPL 2.0
Formats d'import	*.csv (format Simapro), ecospold v1	*.gbx, *.gbr, ilcd, ecospold v1	Tous les formats gérés par Python.	*.zolca, *.csv, excel, ecospold v1 et v2
Formats d'export	*.csv, *.txt, *.xls, *.xlsx, ecospold	*.gbx, *.gbr, ILCD, epd, ecospold v1	Tous les formats gérés par Python.	*.zolca, *.csv, excel, ecospold v1 et v2
Visualisation SIG	Non	Non	Oui	Oui
Scriptage	Non	Non	Oui	Oui
ICV spatialisé	Par région	Par région	Par région et coordonnées géographiques	Par région et coordonnées géographiques
ÉICV spatialisé (calcul géospatial)	Non	Non	Oui	Partiel

3.5.2.2 Outils SIG

Cette section propose un aperçu de divers outils SIG, incluant des logiciels et des bibliothèques open source, susceptibles d'être utilisés en complément des logiciels d'ACV pour intégrer les dimensions spatiales dans les études ACV. L'objectif n'est pas de fournir une présentation exhaustive de ces outils, mais plutôt de les décrire en établissant des liens pertinents avec l'ACV, afin que les praticiens puissent les consulter en fonction de leurs besoins spécifiques.

Une étude commandée par ScoreLCA en 2015 a exploré le couplage entre l'ACV et les SIG (Igos et al., 2015). Le rapport expose divers concepts liés aux SIG, tels que les systèmes de coordonnées géographiques, les systèmes de projection, les couches SIG, les formats de données, les logiciels et les bases de données. De plus, il offre des exemples concrets d'applications des SIG, que ce soit dans la phase d'inventaire pour l'extraction de données ou dans les calculs des FC agrégés à différentes échelles (Igos et al., 2015). Le lecteur est invité à se référer à ce rapport pour plus de détails sur les SIG.

Comme le soulignent Igos et al. (2015), les logiciels SIG se divisent généralement en deux catégories : les logiciels propriétaires et les logiciels libres. Les logiciels propriétaires incluent à la fois des solutions payantes et gratuites. Cette section présente une sélection d'exemples de logiciels libres ainsi que des librairies en Python et en R parmi les plus couramment utilisés et pouvant être utilisés dans le cadre d'études ACV qui tiennent compte de la dimension spatiale.

3.5.2.2.1 QGIS

QGIS, abréviation de *Quantum Geographic Information System*, est un logiciel de SIG diffusé sous licence publique générale GNU (Figure 44). Il se distingue par sa compatibilité étendue avec un large éventail de systèmes d'exploitation, notamment Linux, Unix, Mac OS X, Windows, et même Android. QGIS offre une prise en charge exhaustive de divers formats de données, qu'il s'agisse de données vectorielles, raster, ou de bases de données, en plus d'une palette diversifiée de fonctionnalités. Au moment de la rédaction de ce rapport, la version la plus récente de QGIS est la 3.38.3 Grenoble, tandis que la version maintenue à long terme est la 3.34.5 Prizren. Pour télécharger le logiciel QGIS, rendez-vous sur le site suivant : <https://www.qgis.org/fr/site/forusers/alldownloads.html>.

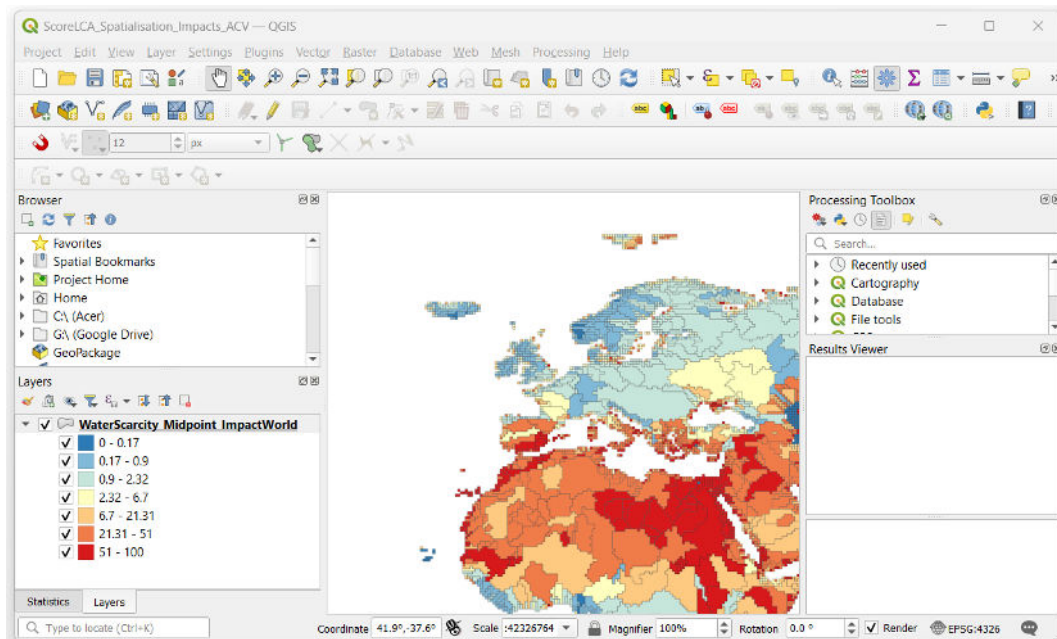


Figure 44. Interface du logiciel QGIS montrant le fichier vectoriel des FC régionalisés pour l'évaluation de la rareté d'eau (Boulay et al., 2018).

3.5.2.2.2 Bibliothèques écrites en Python

L'objectif de la bibliothèque **GeoPandas** est de simplifier la manipulation des données géospatiales en Python, et plus spécifiquement des données en format vectoriel. Cette bibliothèque combine les fonctionnalités de *pandas* et de *shapely*, offrant ainsi des opérations géospatiales dans *pandas* et une interface avec plusieurs géométries pour *shapely*. De plus, *GeoPandas* simplifie des opérations en Python qui autrement nécessiteraient une base de données spatiale comme *PostGIS* (Jordahl et al., 2021). Les directives pour installer la bibliothèque *GeoPandas* sont fournies sur le site : https://geopandas.org/en/stable/getting_started.html. À titre d'exemple, la Figure 45 montre l'affichage de la carte des FC régionalisés de rareté d'eau en utilisant la bibliothèque *GeoPandas*.

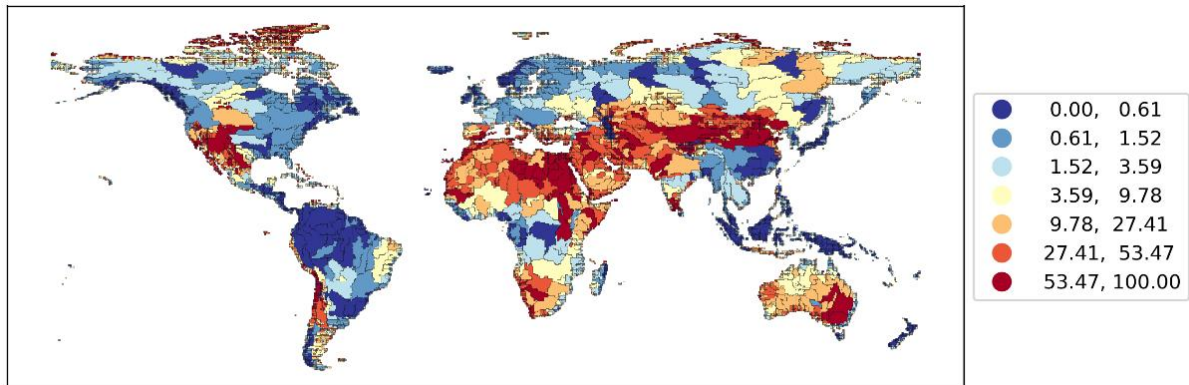


Figure 45. Affichage des FC régionalisées pour l'évaluation de la rareté d'eau [m^3 world eq./ m^3 consommées dans la région i]. Moyenne arithmétique sur douze mois (Boulay et al., 2018).

Les SIG utilisent des formats comme le *GeoTIFF* et d'autres pour organiser et stocker des ensembles de données raster, comme les images satellites et les modèles de terrain. La librairie **Rasterio** facilite la lecture et l'écriture de ces couches spatiales au format raster en fournissant une interface de programmation (API) en Python. Cette API repose sur des tableaux *Numpy* multidimensionnels et le format *GeoJSON* en coulisses (Gillies, 2019). Les instructions pour installer la librairie Rasterio sont fournies sur le site <https://rasterio.readthedocs.io/en/stable/installation.html>.

3.5.2.2.3 Libraires écrites e R

La librairie **sf** facilite le travail avec des données géospatiales en R, et plus particulièrement avec des données en format vectoriel. Cette librairie prend son nom de *simple features* ou des fonctionnalités simples (ISO 19125-1:2004) décrivant la représentation des objets du monde réel dans les ordinateurs mettant particulièrement l'accent sur leur géométrie spatiale. Elle spécifie également le stockage et la récupération de ces objets à partir de bases de données, ainsi que les opérations géométriques qui leur sont associées. Cette norme est largement mise en œuvre dans les bases de données spatiales (comme PostGIS), les logiciels SIG commerciaux (par exemple, ESRI ArcGIS), et sert de fondement aux données vectorielles pour des librairies telles que GDAL (Pebesma, 2018). Les instructions pour installer la librairie sf sont présentées dans le site <https://r-spatial.github.io/sf/#installing>.

La librairie **terra** offre une gamme complète de fonctions pour créer, lire, manipuler et écrire des données raster. Elle inclut des fonctions générales de manipulation qui permettent de développer des fonctionnalités spécifiques. Par exemple, elle propose des outils pour extraire des valeurs raster à partir de fichiers et pour convertir entre numéros de cellules et coordonnées. De plus, elle intègre l'algèbre raster et la plupart des fonctions de manipulation de données raster (Hijmans et al., 2022). Les directives pour installer la librairie terra sont indiquées dans le site <https://r-spatial.github.io/terra/#installation>.

3.5.2.3 Couches et bases de données SIG applicables en ACV

Cette section vise à présenter quelques couches et bases de données spatiales accessibles gratuitement sur Internet qui peuvent s'avérer utiles dans le contexte d'une ACV intégrant la dimension spatiale. Toutefois, il convient de noter que l'exploitation de la plupart de ces données spatiales nécessite l'utilisation d'outils de SIG.

En 2019, un groupe de travail de l'Initiative Cycle de Vie UNEP-SETAC a mis en évidence une lacune dans la cohérence des données entre l'ICV et l'ÉICV, en raison de l'utilisation de différentes échelles spatiales dans les applications pratiques, limitant considérablement la réalisation des ACV régionalisés (Mutel, Liao, Patouillard, Bare, Fantke, Frischknecht, Hauschild, Jolliet, de Souza, et al., 2019). Pour pallier ce problème, Pfister et al. (2020) suggèrent l'adoption d'une couche spatiale universellement

convenue. Celle-ci serait capable de capturer les caractéristiques essentielles nécessaires à l'ÉICV, en plus de prendre en compte les unités politiques pertinentes pour l'ICV. L'objectif principal est donc de faciliter l'intégration des méthodes de l'ÉICV dans les pratiques courantes en ACV. La couche spatiale de Pfister et al. (2020), en format *shapefile*, intersecte six couches spatiales d'importance générale pour l'ACV (Figure 46) :

1. Les frontières politiques, primordiales pour les données d'ICV et leur arrimage avec les données d'entrée-sortie multirégionales (MRIO) afin d'évaluer les systèmes d'arrière-plan.
2. Les écorégions terrestres, recommandées pour évaluer l'utilisation des terres et pertinentes pour d'autres méthodes d'ÉICV concernant les écosystèmes terrestres.
3. Les bassins versants, résolution spatiale recommandée pour évaluer les impacts de la rareté d'eau et importants pour d'autres impacts sur les écosystèmes d'eau douce.
4. Les zones urbaines, essentielles pour évaluer les impacts sur la santé humaine, notamment en ce qui concerne les émissions de particules fines.
5. Les écorégions marines côtières, cruciales pour traiter des problématiques comme l'eutrophisation marine.
6. Les zones de pêche océanique, indispensables pour évaluer des questions telles que l'épuisement des stocks de poissons.

Enfin, le Tableau 14 répertorie les sources des couches spatiales utilisées par Pfister et al. (2020) et ajoute d'autres sources de données pertinentes pour la réalisation des ACV intégrant la dimension géographique.

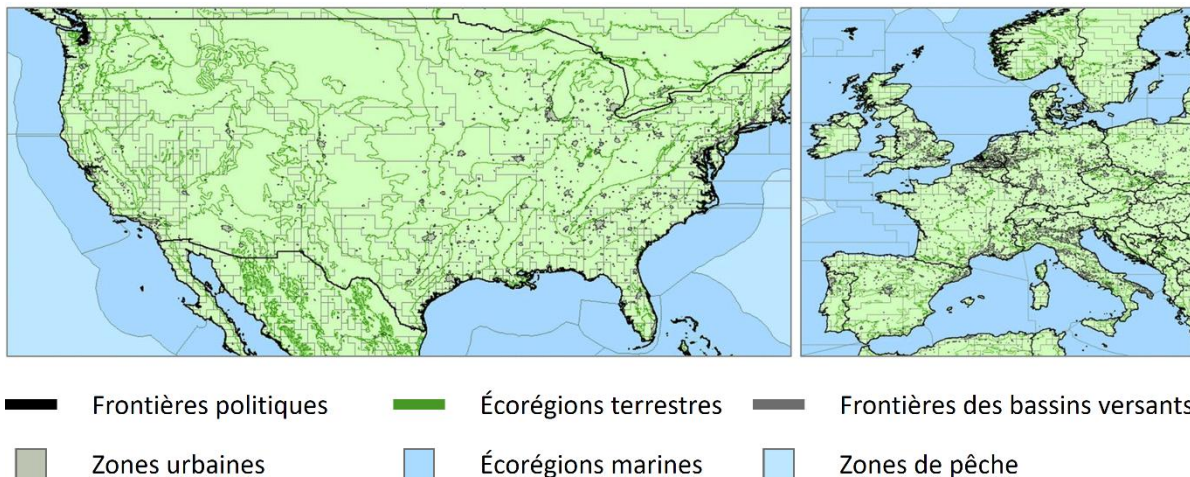
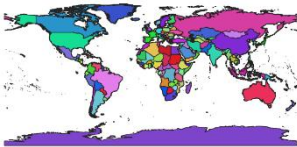
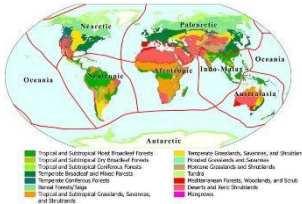


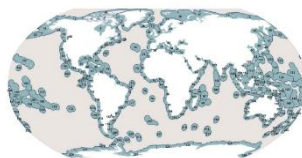
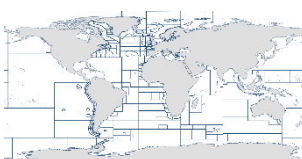
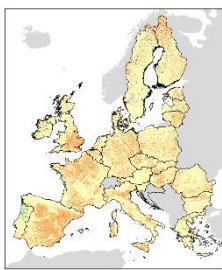
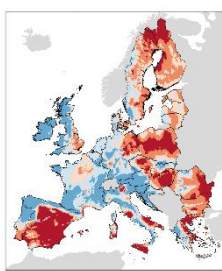
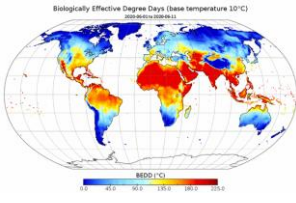


Figure 46. Couche spatiale englobant les caractéristiques environnementales et socio-économiques essentielles dans les évaluations d'ACV et d'empreinte écologique. Adapté de Pfister et al., (2020) .

Tableau 14. Description de données SIG utiles pour la régionalisation des impacts en ACV.

Couche spatiale	Visualisation	Source
Frontières politiques		Country boundaries (subunits), Admin 0, version 4.1.0 (Natural Earth, 2024a).

Couche spatiale	Visualisation	Source
Écorégions terrestres		Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth (Olson et al., 2001).
Bassins versants		Input data (WaterGAP) (WULCA, 2024).
Zones urbaines		Urban Areas. Area of dense human habitation (Natural Earth, 2024b).
Écorégions marines côtières		Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas (Spalding et al., 2007).
Zones de pêche océanique		Statistical Areas for Fishery Purposes (FAO, 2019).
Propriétés des sols		<p>European Soil Data Centre (ESDAC, 2024).</p> <p>Des ensembles de données sont disponibles concernant la teneur en matière organique, en azote, en phosphore. Ces données sont donc pertinentes pour le secteur agricole.</p>
Données climatiques		<p>Global climate and weather data (WorldClim, 2024).</p> <p>Le site met à disposition des ensembles de données historiques et projetées concernant la température, les précipitations, le rayonnement solaire, le vent, ainsi que d'autres variables bioclimatiques.</p>

Couche spatiale	Visualisation	Source
Indicateurs agro-climatiques de 1951 à 2099 dérivés des projections climatiques		<p>Agroclimatic indicators (Copernicus, 2024)</p> <p>Le site propose des données permettant d'évaluer l'impact du climat sur l'agriculture à travers des indicateurs tels que le nombre de jours de gel et le nombre maximal de jours consécutifs.</p>

3.5.3 Développements récents dans l'opérationnalisation (revue de littérature)

Il existe différentes approches mathématiques pour intégrer la régionalisation et la spatialisation dans la structure matricielle standard des logiciels d'ACV. Patouillard et al. (2015) ont décrit une approche initiale supposant que l'inventaire et les impacts partagent la même résolution spatiale, avec une amélioration ultérieure basée sur la pondération des zones affectées proportionnellement à la probabilité des interventions environnementales dans ces régions. Cette probabilité est calculée en appliquant une distribution d'incertitude spatiale lors de la spatialisation de l'inventaire.

En raison des différentes échelles des catégories d'impact, la spatialisation de l'inventaire requiert parfois la combinaison de diverses descriptions géographiques, ce qui représente un défi pour les développeurs de logiciels. Par exemple, dans une étude portant sur la production de pâtes en Iran, l'archétype « États du Golfe d'Asie » était la résolution géographique la plus fine disponible pour la formation photochimique d'ozone, tandis que pour l'utilisation des terres, des écorégions iraniennes représentatives ont été utilisées, car les FC à l'échelle du pays ne seraient pas représentatifs des exploitations étudiées (Heidari et al., 2017).

Bien que l'augmentation de la résolution spatiale engendre une complexité accrue, les matrices précalculées de leur méthode peuvent être intégrées dans des logiciels d'ACV traditionnels pour des calculs ultérieurs. Intégrer des FC régionaux dans les logiciels d'ACV traditionnels est souvent complexe en raison du nombre élevé de flux supplémentaires (Frischknecht et al., 2019). Par conséquent, l'intégration directe de capacités de système d'information géographique (SIG) dans les logiciels semble être une solution prometteuse, car les FC régionalisés ne sont ajoutés à la base de données d'ACV que si nécessaire pour un processus donné. Cependant, comme mentionné dans la section 3.5.2, il est essentiel que l'agrégation des FC à une échelle plus large soit conforme aux recommandations des développeurs des méthodes d'ÉICV. Dans le cas contraire, les divergences observées résulteraient davantage des variations dans les méthodes d'agrégation des FC implémentées dans les logiciels ACV que de la variabilité spatiale du mécanisme environnemental évalué. Brightway semble offrir une capacité de spatialisation avancée, permettant également de pondérer les cartes de FC régionalisés avec des couches de pondération supplémentaires permettant de se conformer à cette recommandation. Ce n'est malheureusement pas le cas des autres outils ACV intégrant le SIG.

Pour harmoniser les résolutions spatiales, des approches de pondération sont couramment utilisées. Par exemple, Di Fulvio et al. (2019) ont appliqué une pondération des écorégions selon la superficie de chaque utilisation des terres dans les régions administratives pour adapter les impacts de perte de biodiversité. Henderson et al. (2017) ont calculé les FC au niveau des États-Unis en pondérant les FC d'impact de l'utilisation de l'eau par la densité animale, en utilisant le *Water stress index (WSI)*. Karimpour et al. (2021) ont créé des agrégations par pays pour divers secteurs de production d'électricité aux États-Unis, démontrant que les agrégations nationales par défaut sous-estiment les impacts. Dans une optique d'harmonisation des résolutions spatiales, Pfister et al. (2020) proposent une carte avec différentes régions qui est compatible avec la plupart des échelles géographiques utilisées dans les bases de données et dans les méthodes d'impact régionalisés. Les régions décrites,

de taille variable, sont établies par superposition de différentes couches : régions urbaines, frontières des pays, écorégions, bassins versants, écosystèmes marins et zones de pêche.

3.6 Interprétation

3.6.1 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). Étant donné cette pratique courante et les enjeux décrits dans les sections précédentes, des efforts lors de l'interprétation sont nécessaires. Les conclusions de la revue de littérature dans le rapport précédent étaient les suivantes (Patouillard et al., 2015):

- Les processus consommateurs d'énergie devraient être régionalisés au niveau national.
- Utiliser l'approche SAME (*Spatial Area of Impact Equivalency*) pour définir le niveau de régionalisation requis en fonction de la variabilité spatiale des impacts. Cette approche repose sur la délimitation de régions présentant une homogénéité dans leur impact, afin de déterminer la résolution de l'inventaire. La définition de ces régions doit intégrer les conditions géographiques influençant le devenir des polluants, les niveaux de fond associés, ainsi que la présence de récepteurs potentiels. Cette approche permet ainsi de réduire le nombre de régions à traiter, tout en simplifiant la collecte des données et en évitant les problématiques de confidentialité de données (Patouillard et al., 2015).

En ligne avec l'énoncé précédent sur les processus consommateurs d'énergie, Milovanoff et al. (2020) soutiennent que l'échelle appropriée pour la régionalisation de l'utilisation de l'électricité est la plus petite taille du réseau électrique, pouvant également être sous-nationale. Henriksen et al. (2018) examinent deux situations particulièrement délicates en termes d'échelle de régionalisation et proposent des recommandations pour les aborder : 1) l'utilisation de données agrégées dans un contexte d'étude visant à faire des généralisations et 2) l'utilisation de données spécifiques au site pour des contextes et lieux particuliers. Loiseau et al. (2020) soulignent qu'il devrait exister une distinction entre les archétypes ruraux et urbains dans les ACV des chaînes d'approvisionnement nationales du secteur alimentaire en raison des distances de transport variables.

Milovanoff et al. (2021) examinent également l'exigence de régionalisation de la technologie pour les études sur l'approvisionnement en métaux. Si les processus de production d'un métal sont similaires dans toutes les régions, un processus global pourrait être approprié. Cependant, si les produits intermédiaires importés jouent un rôle crucial dans l'ICV et sont échangés à l'échelle mondiale, une combinaison d'ES et d'ACV pourrait être nécessaire pour prendre en compte les variations dans les chaînes d'approvisionnement.

Quant à la spécification de l'inventaire d'un point de vue spatial, Patouillard et al. (2015) soulignent la problématique de la sélection des flux élémentaires à spatialiser ainsi que du degré de spatialisation requis. Différentes approches de priorisation ont été décrites par Patouillard et al. (2015) et nous en rajoutons d'autres, publiées après l'étude de ScoreLCA:

- **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). Cette approche a été adoptée à divers degrés dans la littérature. Par exemple, dans l'étude sur la réutilisation de l'eau de

Maesele et Roux (2021), seuls les processus liés à l'électricité et à l'eau sont régionalisés, jugés les plus pertinents pour la technologie étudiée. De même, Jouannais et al. (2022) maintiennent délibérément constants les bouquets énergétiques entre deux pays pour mettre en évidence l'impact d'autres aspects géographiques sur leurs résultats finaux.

- **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). Dans leur étude sur l'alimentation des poules pondeuses, Heidari et al. (2021) se sont concentrés sur la régionalisation des processus ayant le plus grand impact, comme ils ont identifié dans la littérature reliée à leur cas d'étude. Cependant, la priorisation basée sur la contribution à l'impact peut négliger des processus qui devraient être régionalisés, mais ont un faible impact simplement parce qu'ils n'ont pas encore été régionalisés (Hernández-Padilla et al., 2017). Ainsi, ces auteurs définissent la fin de la régionalisation (itérative) en utilisant l'approche de contribution comme le point où l'ordre des contributions entre les processus reste constant. Également, 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 processus sont régionalisés ou spatialisés s'ils contribuent de manière significative lors de l'analyse de sensibilité globale. (Patouillard et al. (2019) proposent une approche par étapes pour identifier les éléments à régionaliser en priorité basée sur leur contribution à la sensibilité globale calculée avec des indices de Sobol. 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.

3.6.2 Développements récents dans la phase d'interprétation

La phase d'interprétation de l'ACV connaît quelques développements qui méritent une attention particulière. Cette section présente les avancées récentes dans la régionalisation de l'inventaire et des impacts, ainsi que leur influence sur la phase d'interprétation, en mettant particulièrement l'accent sur leur effet sur la formulation des conclusions.

Fabrizi et al. (2023) ont observé que la régionalisation des impacts avait moins d'incidence sur leurs conclusions que la régionalisation de l'inventaire de quelques produits agricoles tels que la betterave, la canne à sucre, le maïs, et le bois. Toutefois, la principale limitation de l'étude réside dans le fait que les flux d'utilisation des terres n'ont pas été spatialisés. Il est donc essentiel d'évaluer la robustesse des conclusions lorsque des FC régionalisés pour cette catégorie d'impact sont appliqués.

Pour évaluer l'effet de la régionalisation des FC de l'eutrophisation dans leur ACV agricole, Beltran et al. (2023) ont mené une évaluation avec des FC génériques. Leurs résultats indiquent que ces derniers surestiment les impacts de l'eutrophisation des eaux douces tout en sous-estimant ceux de l'eutrophisation marine. De plus, ils ont calculé les impacts en se basant sur les parcelles agricoles, mais ont analysé les impacts totaux à l'échelle régionale, en utilisant les parcelles individuelles comme éléments d'une distribution d'incertitude. Néanmoins, les auteurs soulignent les incertitudes associées aux inventaires des émissions d'azote et de phosphore et insistent sur la nécessité de développer des méthodes de calcul plus sophistiquées. Ces méthodes devraient prendre en compte les caractéristiques biophysiques des milieux concernés.

Le concept de représentativité géographique dans l'ACV est remis en question par Lin et Chiueh (2021). Ils avancent que les FC régionalisés devraient refléter la perception locale des dommages acceptables, plutôt que d'appliquer des normes mondiales. Les auteurs reconnaissent la valeur des modèles génériques et des métriques standardisées comme références comparatives. Toutefois, ils soulignent que, lorsque les résultats concernant les impacts de la consommation d'eau servent de base à la prise

de décision politique, il est crucial d'inclure également la perception de la société locale. En effet, la sensibilisation environnementale peut varier considérablement d'une région à l'autre, et cette variabilité doit être considérée dans le processus de comparaison.

Enfin, la matrice Pedigree est un outil crucial dans l'évaluation de la qualité des données, incluant l'évaluation de la représentativité technologique et géographique. Une approche novatrice présentée par Henriksen et al. (2021) vise à améliorer la compréhension de la représentativité géographique en utilisant cette matrice. Ils ont établi quatre catégories pour évaluer un processus : 1) le climat et l'environnement, 2) la législation, 3) le niveau de revenu, 4) la demande et l'offre sur le marché. Pour être considéré comme représentatif, un processus doit l'être dans chacune de ces catégories, avec des aspects variables pertinents pour chaque processus individuel. Par exemple, dans la catégorie 1, les modèles de précipitations peuvent être importants pour certains processus, tandis que pour d'autres, c'est la zone climatique qui importe. Cette approche offre un mécanisme pour quantifier la représentativité et révèle que, pour certaines technologies, les facteurs socio-économiques et environnementaux sont cruciaux, contrairement à l'approche habituelle de la matrice Pedigree qui se concentre généralement sur les aspects socio-économiques (Henriksen et al., 2021).

4. Revue des exigences réglementaires et normatives

Les exigences réglementaires et normatives disponibles et fournissant les recommandations les plus pertinentes en ACV ont été sélectionnées et différents éléments relatifs à ces références sont recensés afin de faire le portrait du traitement des enjeux géographiques. Ces références sont issues d'instances internationales reconnues, de groupes de réflexion faisant consensus dans le domaine et d'organismes affichant la volonté de formuler des recommandations en ACV. Trois types de documents ont été consultés :

- Les normes internationales telles que celles développées par ISO;
- Les textes législatifs ou normatifs de régions, tels que les directives européennes ou des PCR (*Product Category Rules*),
- Les guides fournissant des recommandations sur les pratiques en ACV en général (*ILCD Handbook*) ou pour un secteur particulier (lignes directrices d'associations sectorielles).

Les éléments recherchés dans les différentes références sont :

- La mention de l'aspect spatial lors de la définition des O&C (objectifs et champ de l'étude);
- Des exigences ou recommandations sur l'aspect spatial lors de la collecte de données et le calcul de l'inventaire;
- Des exigences ou recommandations sur l'aspect spatial lors de la sélection des catégories et méthodes d'ÉICV;
- D'autres mentions (par exemple lors de l'interprétation ou sur les avenues possibles des nouveaux développements).

En général, les documents consultés ne traitent pas en détail la question géographique. Des recommandations ou affirmations autour de la définition du système à l'étude (O&C) et de l'utilisation de données régionalisées sont les principales mentions à la question géographique.

Selon l'ILCD, les flux élémentaires dont l'impact dépend du lieu d'émission devraient être spatialisés pour pouvoir ensuite utiliser des FC régionalisés (Wolf et al., 2010). L'information spatiale devrait être recueillie séparément pour pouvoir être utilisée plus tard. Les recommandations ne précisent cependant pas un format particulier pour recueillir ces informations. L'ILCD précise également que la spatialisation des flux élémentaires relatifs aux ressources doit être évitée, à moins que les méthodes d'impact le requièrent. Dans le cas où la méthode d'impact utilisée nécessite une spatialisation des flux élémentaires, l'inventaire ne doit pas être présenté de manière agrégée dans le rapport.

La norme ISO 14046, traitant sur le calcul de l'empreinte eau indique que le calcul de cette empreinte doit être réalisé à une échelle et à une résolution qui donne des résultats pertinents en fonction de l'objectif et le champ de l'étude et qui tient compte de l'environnement (ISO, 2014). Également, la norme mentionne, pour la phase d'ÉICV et lors de l'interprétation des résultats, que l'évaluation doit tenir compte des conditions locales.

Le premier volume du guide pour l'évaluation des impacts en ACV (*Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators*) (Frischknecht & Jolliet, 2017) établit des recommandations générales quant aux catégories d'impact en ACV et donne des recommandations spécifiques pour des questions transversales, dont les aspects géographiques. Les auteurs affirment que « *la différenciation spatiale peut contribuer à accroître la précision des résultats de l'ACV (Mutel et al. 2009)* » et que « *les échelles spatiales peuvent varier d'une catégorie d'impact à l'autre (p. ex., les cellules de la grille aérienne, les écorégions ou les données hydrologiques à plus haute résolution)* ». À la lumière de ces observations, plusieurs recommandations sont faites :

- Choisir l'échelle géographique adéquate pour chaque catégorie d'impact, en considérant la réalité physique de l'impact et la disponibilité de données;
- Développer des cartes de FC régionalisés natifs;

- Agréger les FC régionalisés natifs à des échelles adéquates et compatibles avec les données d'inventaire et les logiciels (pays, continent, archétype). Les auteurs recommandent l'utilisation d'une moyenne pondérée pour cette agrégation (basé sur la consommation ou sur la production des flux élémentaires);
- Informer sur l'incertitude des FC régionalisés, tant au niveau natif qu'au niveau agrégé. Si une quantification n'est pas possible, le faire de manière qualitative;
- Fournir une documentation transparente et détaillée de l'échelle et les méthodes utilisées pour le calcul des FC et les agrégations faites.

Les auteurs identifient aussi quatre questions clés à développer dans la recherche :

- Le développement d'un format de données pour les catégories d'impact régionalisées;
- Le développement d'une méthode commune d'agrégation des FC;
- La régionalisation de l'inventaire de la part des développeurs de bases de données qui permet l'utilisation des FC régionalisés;
- Le développement de logiciels permettant l'utilisation de catégories d'impact régionalisées.

Le guide général du PEF (PEFCR Guidance) ne traite pas en détail la question de la régionalisation de l'inventaire, où la seule recommandation porte sur l'utilisation des mix électriques régionaux. Quant à l'ÉICV, seules deux catégories parmi les recommandées présentent des échelles plus précises que l'échelle globale : l'utilisation de terres (*land use*) et l'utilisation d'eau (*water use*) (voir section 3.4.1.5).

En conclusion, l'analyse de plusieurs normes et documents de référence montre que 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. La dimension géographique y est abordée de manière relativement sommaire. 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.

5. Étude de cas

5.1 Description générale de l'étude de cas

Afin d'illustrer les enjeux et limites présentés dans les sections précédentes, une étude de cas a été développée dans cette section. Elle utilise différentes approches, alternatives, et outils possibles pour la mise en œuvre de la spatialisation des impacts en ACV et illustre les étapes d'application, leurs complexités et besoins, ainsi que des recommandations pratiques. L'influence de différents choix et méthodes sur les résultats et conclusions est ensuite discutée, ainsi que leur pertinence dans un processus de prise de décision.

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.

Le produit étudié est un shampoing dont les matières premières proviennent d'Asie et d'Europe principalement dont la production a lieu en Pologne et l'utilisation et la fin de vie en France (Figure 47). L'étude de cas s'appuie en grande partie sur la modélisation présentée dans l'article de Golsteijn et al. (2018) et un rapport de Cosmetics Europe (2016b), qui proviennent des travaux en lien avec le projet PEF (*Product Environmental Footprint*) de la Commission européenne. Cette étude a servi lors de la phase de test sur le développement de « Règles de Catégorie d'Empreinte Environnementale des Produits » (PEFCR) pour les shampoings.

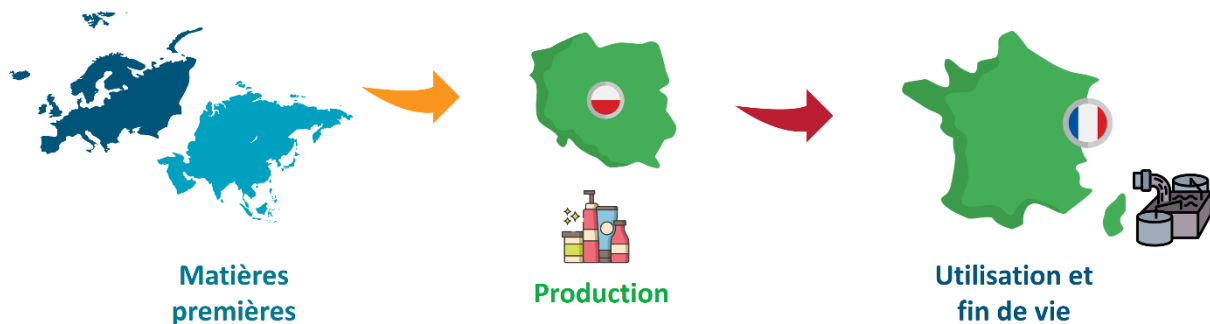


Figure 47 : Illustration du cycle de du shampoing à l'étude.

Dans l'étude de Golsteijn et al. (2018), bien que cinq sous-catégories de shampoings aient été identifiées, un produit représentatif unique a été sélectionné pour simplifier l'analyse. Conformément à cette approche, cette étude de cas a également retenu un seul produit. Le Tableau 15 présente un résumé des principales caractéristiques du shampoing choisi.

Tableau 15. Caractéristiques de la bouteille de shampoing (Cosmetics Europe, 2016b)

Catégorie	Description
Nom du produit	Shampoing antipelliculaire Eucalyptus et Citron - <i>Ultra Doux de Garnier</i>
Classification du produit	C 20.42.16.30 <i>Shampoos</i>
Catégorie du shampoing	Nettoyage des cheveux et activité antipelliculaire
Entreprise	L'Oréal

Catégorie	Description
Localisation de l'entreprise	France
Validité géographique	Fabriqué en Pologne, distribué et utilisé en France

L'unité fonctionnelle retenue pour cette étude de cas est la suivante :

« **Un lavage de cheveux effectué en France sur des cheveux de longueur moyenne.** » Le flux de référence associé à cette unité fonctionnelle, représentant la quantité de produit nécessaire, a été fixé à 10,46 grammes de shampoing (Cosmetics Europe, 2016b; Golsteijn et al., 2018).

Les frontières du système comprennent les étapes suivantes : la production des ingrédients du shampoing, la fabrication et le transport des emballages, la production du shampoing, la distribution et le stockage, l'utilisation, ainsi que la gestion en fin de vie des emballages et du shampoing (Figure 48).

Frontières du système

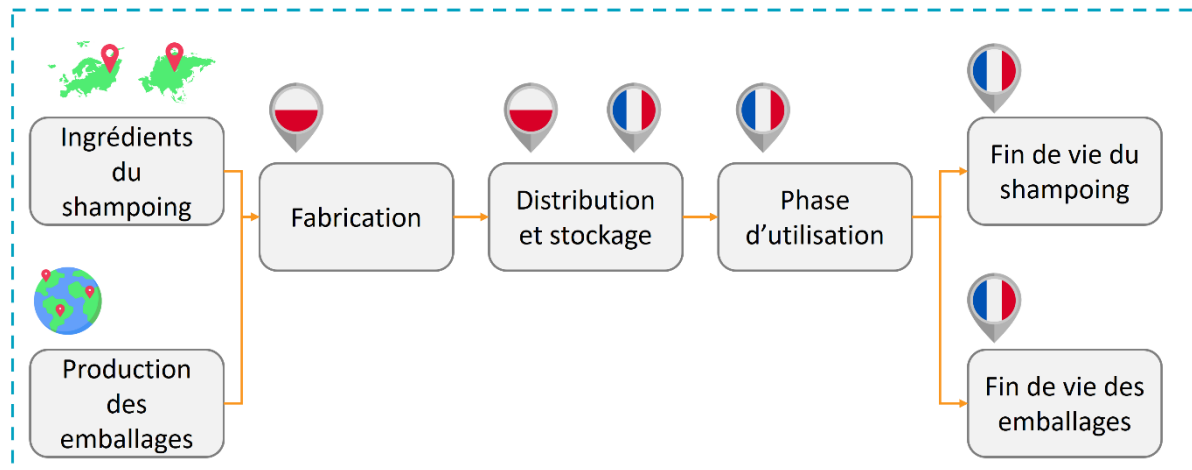


Figure 48. Système de produit comportant les principales étapes du cycle de vie du shampoing.

Les paragraphes suivants présentent un résumé des hypothèses formulées pour chaque étape du cycle de vie :

Ingrédients du shampoing : Elle comprend exclusivement les quantités des ingrédients nécessaires à la formulation du shampoing. De plus, les processus de transport ont été intégrés, en tenant compte des distances moyennes de transport équivalentes à celles utilisées dans les processus de marché de la base de données ecoinvent 3.9.1, lorsque des procédés de production des substances chimiques ont été utilisés.

Production des emballages : Cette étape inclut les matériaux utilisés pour l'emballage primaire (bouteille, bouchon et étiquettes), l'emballage secondaire (boîtes, films et étiquettes), ainsi que l'emballage tertiaire (palettes). Elle inclut également les processus de transformation de ces matériaux, tels que l'extrusion et le thermoformage, ainsi que les opérations de transport des matériaux.

Fabrication : Cette étape couvre divers aspects, notamment la consommation d'énergie et d'eau, ainsi que le traitement des eaux usées. En l'absence de données primaires sur l'infrastructure de l'usine de fabrication, il a été considéré que cette usine présente des caractéristiques similaires à celles du processus ecoinvent pour l'usine chimique (*Chemical factory construction, organics*) en ligne avec

Cosmetics Europe (2016b). Cette hypothèse a été utilisée comme référence et ajustée à l'échelle de la production de shampoing.

Distribution et stockage : Cette phase englobe l'énergie et la chaleur pour les entrepôts ainsi que le transport. Une distance de 1500 km a été retenue entre l'usine située en Pologne et le point de vente localisé en France. Conformément aux hypothèses de Cosmetics Europe (2016b), le produit est acheté par le consommateur et transporté en voiture (1 personne par véhicule) sur une distance de 4 km, avec 5 % du trajet attribué au produit. Le centre de distribution est considéré comme un bâtiment multi-étage, avec une durée de vie de 80 ans. De plus, il a été considéré qu'une bouteille de shampoing requiert un volume de stockage dix fois supérieur à ses dimensions (2 cm x 7 cm x 15 cm) et qu'elle est entreposée pendant un mois.

Phase d'utilisation : Cette phase comprend la consommation d'eau, le traitement des eaux usées et la consommation d'énergie associée à l'utilisation de la douche. Par souci de simplification, l'utilisation d'eau chaude pendant la douche est entièrement imputée à l'utilisation du shampoing. Une valeur par défaut de 15 litres par douche a été adoptée, fondée sur des données d'un coiffeur et sur un jugement d'expert (Golsteijn et al., 2018). Il est important de noter que l'eau chaude peut également servir à d'autres fins, telles que le confort et le rinçage d'autres produits cosmétiques. De plus, cette phase présente une incertitude élevée en raison des variations considérables dans les habitudes d'utilisation des consommateurs. Cependant, l'évaluation détaillée de cette phase a été jugée hors du champ de cette étude.

Fin de vie des emballages : Dans l'article de Golsteijn et al. (2018), la gestion des déchets dans l'Union Européenne (UE-28) a été prise en compte pour modéliser la gestion des emballages en fonction de la proportion des matériaux recyclés ou envoyés aux sites d'enfouissement. Pour cette étude de cas, il a été décidé d'utiliser les processus de gestion des déchets spécifiques au contexte français disponibles dans la base de données ecoinvent 3.9.1, jugés plus actuels et pertinents.

Fin de vie du shampoing : Après utilisation sous la douche, il est considéré qu'une partie des ingrédients du shampoing est relâché directement dans le compartiment eau douce, tandis que le reste est traité dans les stations d'épuration (Cosmetics Europe, 2016b; Golsteijn et al., 2018). Les émissions des ingrédients du shampoing en fin de vie ont été calculées selon l'équation suivante :

$$E_{substance} = M_{substance} \times [(1 - HH_{connectivity}) + HH_{connectivity} \times (1 - WWT_{efficiency})]$$

$E_{substance}$ La quantité d'ingrédient émise dans l'environnement.

$M_{substance}$ La quantité d'ingrédient constituant le shampoing.

$HH_{connectivity}$ Connectivité des foyers.

$WWT_{efficiency}$ Efficacité de la station d'épuration des eaux usées.

Un taux de connectivité des foyers de 85 % a été considéré. En outre, il a été supposé que la station d'épuration dispose d'un taux d'élimination par défaut de 90 % pour toutes les substances, ce qui signifie que 10 % des substances entrant dans la station étaient rejetées dans l'environnement.

Enfin, le Tableau 16 récapitule les principales sources de données utilisées pour chaque étape du cycle de vie, afin de compléter les informations présentées dans l'étude de Golsteijn et al. (2018). L'inventaire du cycle de vie pour le cas d'étude est accessible dans l'Annexe 8.3.

Tableau 16. Principales sources des données de l'ICV de l'étude de cas

Étape du cycle de vie ou autre catégorie d'information	Description	Source
Caractéristiques du produit	Principales caractéristiques de la bouteille de shampoing.	(Cosmetics Europe, 2016b; Golsteijn et al., 2018; Torres et al., 2019)
Ingrédients du shampoing	Ingrédients du shampoing, gamme de composition et évaluation de la qualité des données.	(Cosmetics Europe, 2016b)
Production des emballages	Quantités d'emballage et évaluation de la qualité des données.	(Cosmetics Europe, 2016b)
Fabrication	Données de fabrication et évaluation de la qualité des données.	(Cosmetics Europe, 2016b, 2016a)
Distribution et stockage	Hypothèses concernant la distribution et le stockage du produit.	(Lessard et al., 2016)
Phase d'utilisation	Hypothèses concernant la phase d'utilisation.	(Golsteijn et al., 2018; Lessard et al., 2016)
Fin de vie des emballages	Hypothèses concernant la fin de vie de l'emballage.	(Lessard et al., 2016)
Fin de vie du shampoing	Modélisation de la fin de vie des ingrédients.	(Cosmetics Europe, 2016b)

5.2 Base de données

La modélisation de l'arrière-plan du système de produit pour le shampoing a été effectuée en utilisant la base de données ecoinvent 3.9.1. Cette base de données couvre de nombreuses régions géographiques, comprenant des pays individuels, des subdivisions administratives (comme des états ou provinces), ainsi que des zones spécifiques et des continents. Pour chaque région, l'inventaire est ajusté pour refléter au minimum le mix électrique régional et le volume de production. Chaque processus est associé à une géographie, à partir de laquelle il tire ses flux élémentaires directs, ceux ayant lieu dans le cadre du processus *gate-to-gate*.

5.3 Description des outils utilisés

Trois logiciels d'ACV largement utilisés — SimaPro, openLCA et Brightway — ont été employés pour examiner en détail les étapes d'application, les complexités associées et les exigences pratiques liées à l'intégration de la dimension géographique en ACV. Il est bien établi que les résultats des ÉICV peuvent varier selon le logiciel d'ACV utilisé. Ces variations résultent principalement des différences entre les versions des méthodes d'ÉICV et des spécificités opérationnelles propres à chaque développeur de logiciel (Lopes Silva et al., 2019). Toutefois, cette étude de cas ne vise pas à examiner de manière approfondie les divergences de résultats en fonction du logiciel choisi, mais se concentre

sur la démonstration de l'opérationnalisation de l'ACV régionalisée dans chaque logiciel et des limites associées.

Les sous-sections suivantes fournissent une description des logiciels employés ainsi que des versions des méthodes d'impact qui ont été utilisées. Pour plus de détails sur les logiciels, se référer à la section 3.5.2

5.3.1 SimaPro

La version 9.6.0.1 de SimaPro a été utilisée pour l'étude de cas. Dans cette version, tel qu'expliqué dans la section 3.5.2.1.1, le traitement des aspects géographiques se fait au moyen de la duplication des flux élémentaires avec des noms incluant des indications géographiques telles que le code ISO d'un pays. Ces flux spatialisés sont utilisés dans les processus élémentaires et dans les méthodes d'ÉICV. L'utilisation de flux dupliqués fait en sorte que les méthodes d'ÉICV doivent inclure tous ces flux spatialisés pour qu'ils soient caractérisés lors du calcul des scores d'impact. Lors de son implémentation dans SimaPro, seuls les flux d'eau sont spatialisés dans ecoinvent avec cette approche. SimaPro inclut aussi des archétypes pour les flux d'utilisation de terres et sous forme de sous-compartiment pour certaines émissions à l'air.

En plus de la version classique du logiciel, la version *online* du logiciel (SimaPro flow), développée dans les dernières années, a été utilisée pour l'étude de cas. Bien que cette version ne convienne pas pour des études ACV complètes⁷, elle a été retenue en raison de sa capacité à calculer de résultats d'impact spatialisés. Dans son option par défaut, cette version ne calcule pas des résultats d'impact spatialisés puisqu'elle utilise des données agrégées pour accélérer le calcul. L'option d'ACV régionalisée doit être sélectionnée lors du lancement du calcul. En combinaison avec l'utilisation de données désagrégées, elle permet de calculer des résultats d'ICV spatialisés selon la géographie du processus auquel chaque flux élémentaire appartient et de le combiner avec des FC régionalisés.

5.3.2 openLCA

La version 2.2 d'openLCA a été utilisée pour l'étude de cas. Comme mentionné à la section 3.5.2.1.4, deux choix apparaissent quant à l'ACV régionalisée :

- L'utilisation de flux dupliqués incluant dans le nom l'indication géographique (même approche que celle utilisée dans SimaPro). Cette option n'est pas présentée dans l'étude de cas puisque son utilisation est égale à celle présentée dans SimaPro.
- Une approche géospatiale qui tient compte de la géographie des processus lors du calcul pour obtenir un inventaire complètement spatialisé et l'associer avec des méthodes d'ÉICV dont les FC sont agrégés pour ces mêmes géographies.

5.3.3 Brightway

Pour la réalisation de l'étude de cas, la version 2.4.2 de Brightway 2 a été utilisée. Cette précision est importante, car la version la plus récente de Brightway à ce jour est la 2.5. Le choix d'une version moins récente s'explique par sa compatibilité avec l'Activity-Browser (version 2.9.7) et Regioinvent (cette dernière décrite à la section 3.3.2). L'Activity-Browser a été employé pour créer les systèmes de produits, en raison de la simplicité qu'offre son interface graphique. Par ailleurs, Brightway a été utilisé directement via des Jupyter Notebooks pour les calculs, facilitant ainsi la documentation et la reproductibilité des résultats (Figure 49).

Pour le calcul de scores d'impact spatialisés, une approche reposant sur la spatialisation des flux élémentaires a été employée pour associer les flux élémentaires aux FC. Tel que détaillé dans les

⁷ Les développeurs de Simapro recommandent l'outil *online* pour la collaboration avec des non-experts et pour le partage des résultats. <https://support.simapro.com/s/article/When-to-choose-which-tool-SimaPro-desktop-or-SimaPro-online-platform>

sections relatives à l'implémentation du modèle ACV dans Brightway (section 5.7.1), cette procédure a été réalisée à l'aide de la librairie Python Regioinvent (Agez, 2024).

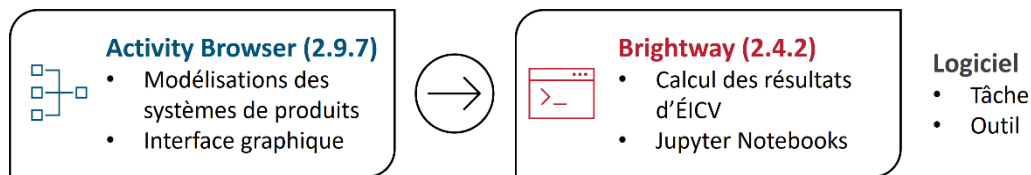


Figure 49. Étapes de modélisation de l'étude de cas dans Brightway

5.4 Description des analyses menées

L'étude de cas 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. Cette analyse permet de déterminer, dans le contexte spécifique du shampoing, quel niveau de prise en compte des aspects spatiaux influe le plus significativement sur les résultats de l'ACV, tout en reconnaissant que les conclusions ne peuvent être généralisées à partir d'un seul exemple. La Figure 50 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. Cette dernière est le cas, par exemple, de SimaPro, où les méthodes d'ÉICV incluent des FC régionalisés par défaut pour la méthode AWARE.

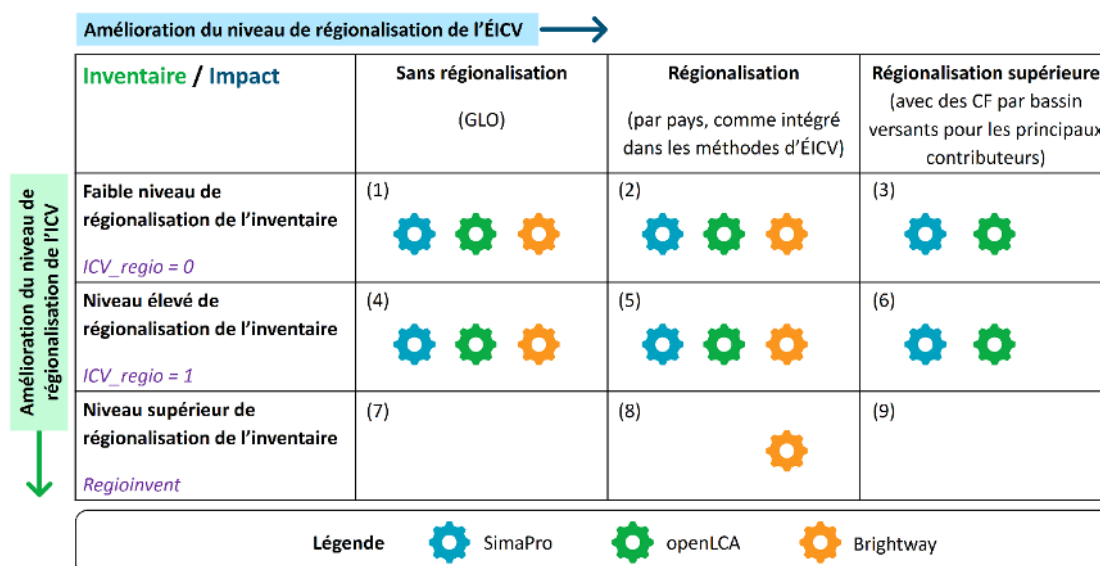


Figure 50. Matrice des analyses possibles pour l'étude de cas. Les colonnes illustrent les niveaux croissants de régionalisation appliqués à la phase d'ÉICV (de gauche à droite), tandis que les lignes reflètent les niveaux d'amélioration de la régionalisation de l'inventaire (de haut en bas). Les icônes d'engrenages indiquent la possibilité de réaliser une analyse avec chaque logiciel. Les numéros entre parenthèses permettent d'identifier les éléments de la matrice.⁸

En ce qui concerne la régionalisation de l'inventaire (voir les lignes de la Figure 50), deux niveaux de régionalisation ont été examinés en utilisant le paramètre *ICV_regio*, servant d'interrupteur entre ces deux niveaux (Figure 51). Ce paramètre a été intégré dans la modélisation à l'aide de divers logiciels

⁸ La matrice montre les analyses possibles avec chaque logiciel. Le rapport ne présente pas toutes les analyses possibles.

d'ACV, permettant ainsi une analyse plus détaillée des scénarios et augmentant la flexibilité du modèle pour représenter l'utilisation du shampoing.

Initialement, le paramètre **ICV_regio** a été réglé sur 0, ce qui correspond à l'utilisation de processus de marché globaux (*GLO*), Reste du Monde (*RoW*) ou Europe (*RER*). Ce réglage représentait une résolution faible de l'inventaire, où le lieu de production des ingrédients n'était pas spécifié ou lorsque des processus spécifiques n'étaient pas disponibles dans la base de données ecoinvent 3.9.1 pour un pays donné.

Ensuite, le paramètre **ICV_regio** a été ajusté à 1 pour inclure des processus de production ou de marché plus spécifiques au lieu de production ou d'utilisation du shampoing, comme indiqué à la section 5.1.

La Figure 51 présente les processus concernés par ce changement et un exemple de cette modélisation. L'Annexe 8.3 présente le détail des processus utilisés pour chaque niveau de régionalisation.

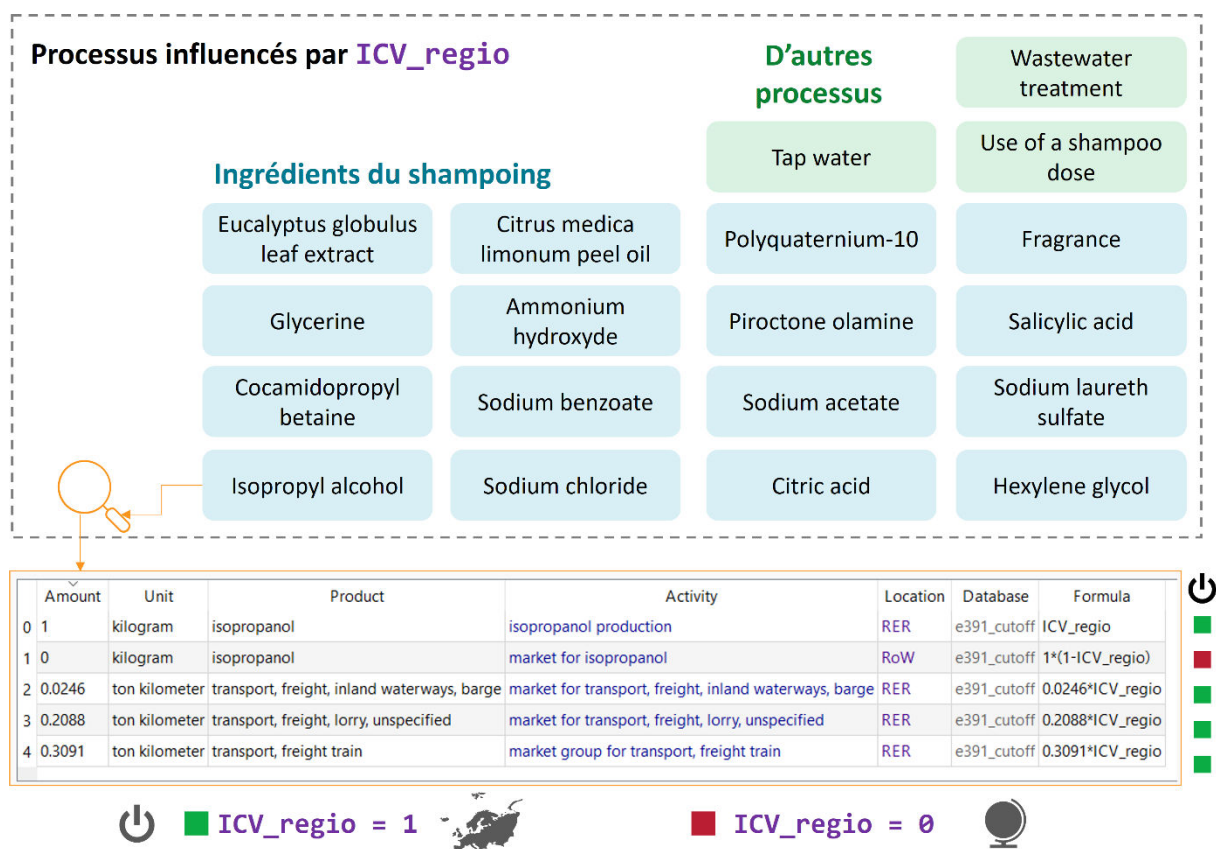


Figure 51. Processus influencés par le paramètre **ICV_regio**, incluant ceux relatifs aux ingrédients du shampoing, à l'eau et à la phase d'utilisation du shampoing. L'exemple de l'alcool isopropylique illustre comment le paramètre **ICV_regio** fonctionne comme un interrupteur, permettant de basculer entre des processus spécifiques à l'étude de cas en Europe et des processus globaux ou RoW.

Enfin, le niveau le plus avancé de régionalisation de l'ICV (voir la dernière ligne de la Figure 50) a employé la base de données Regioinvent, laquelle intègre des données commerciales et de consommation pour adapter les processus à différents pays ou régions. Cette approche a permis de régionaliser des entrants tels que l'électricité, la chaleur et le traitement des déchets solides municipaux. De plus, elle a inclus la spatialisation des flux élémentaires, tels que ceux relatifs à l'eau et à l'utilisation des terres, ainsi que des flux associés aux impacts d'acidification et d'eutrophisation (voir section 2.3.2). Il est important de noter que Regioinvent est actuellement disponible uniquement dans Brightway 2 et


est compatible seulement avec ecoinvent 3.9.1. Pour plus de détails sur l'implémentation du modèle de shampooing avec Brightway, veuillez consulter la section 5.7.1.

Concernant les méthodes d'ÉICV, bien que d'autres méthodes aient été présentées dans la section 3.4 pour illustrer les niveaux de régionalisation implémentés dans différents logiciels d'ACV, seules trois méthodes ont été sélectionnées pour simplifier les analyses et atteindre l'objectif de démonstration des capacités actuelles : EF 3.1, IMPACT World+ 2.0.1 et LC-IMPACT. La méthode EF 3.1 a été choisie en raison de l'intérêt spécifique des membres de ScoreLCA, en lien avec leur contexte opérationnel européen. Toutefois, il convient de noter que la résolution spatiale de la méthode EF 3.1 dans le logiciel Brightway est limitée. La Figure 52 illustre certains FC pour l'utilisation de l'eau et des terres de la méthode EF 3.1, qui ne sont pas régionalisés dans Brightway. En réponse à cette limitation, la méthode IMPACT World+ a également été employée, offrant une meilleure régionalisation à travers les différents logiciels. Plusieurs versions de cette méthode existent⁹ :

- la version *Expert 2.01*, qui calcule les résultats de 27 catégories contribuant à deux aires de protection (*Human health* et *Ecosystems quality*) ;
- La version *Midpoint 2.01*, qui calcule des scores pour 18 catégories ;
- La version *Footprint 2.01*, qui calcule des scores pour cinq indicateurs (*Carbon footprint*, *Fossil and nuclear energy use*, *Water scarcity footprint*, *Remaining Human health damage*, et *Remaining Ecosystems quality damage*).

Dans l'étude de cas, les versions *Expert* et *Midpoint* sont utilisées. La version *Expert* pour mettre en évidence l'importance du calcul d'impacts spatialisés pour la contribution relative de chaque catégorie au score total au niveau de l'aire de protection. La version *Midpoint* est utilisée notamment pour illustrer, au moyen de la catégorie *Water scarcity* la pertinence de calculer les scores d'impact spatialisé avec des FC natif.

Enfin, la méthode LC-IMPACT est utilisée dans openLCA puisqu'elle est actuellement la seule méthode d'ÉICV disponible qui permet de réaliser des calculs selon une approche géospatiale dans ce logiciel.




Utilisation de l'eau

Method: EF v3.1 - water use - user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)

Hide uncertainty columns Edit Characterization Factors

Name	Category	Amount	Unit	Uncertainty
0 Water	('air', 'low population density, long-term')	42.95	cubic meter	Undefined or unknown uncertainty
1 Water	('air', 'lower stratosphere + upper troposphere')	42.95	cubic meter	Undefined or unknown uncertainty
2 Water	('air', 'non-urban air or from high stacks')	42.95	cubic meter	Undefined or unknown uncertainty
3 Water	('air')	42.95	cubic meter	Undefined or unknown uncertainty
4 Water	('air', 'urban air close to ground')	42.95	cubic meter	Undefined or unknown uncertainty



Utilisation des terres

Method: EF v3.1 - land use - soil quality index

Hide uncertainty columns Edit Characterization Factors

Name	Category	Amount	Unit	Uncertainty
0 Occupation, annual crop	('natural resource', 'land')	50.191	square meter-year	Undefined or unknown ...
1 Occupation, annual crop, flooded crop	('natural resource', 'land')	39.581	square meter-year	Undefined or unknown ...
2 Occupation, annual crop, greenhouse	('natural resource', 'land')	36.405	square meter-year	Undefined or unknown ...
3 Occupation, annual crop, irrigated	('natural resource', 'land')	50.191	square meter-year	Undefined or unknown ...
4 Occupation, annual crop, irrigated, extensive	('natural resource', 'land')	46.211	square meter-year	Undefined or unknown ...

Figure 52. Exemple de FC pour l'utilisation de l'eau et des terres selon la méthode EF 3.1, telle qu'implémentée dans le logiciel Brightway et accessible via l'Activity Browser.

⁹ Pour une description plus détaillée des versions : http://impactworldplus.org/wp-content/uploads/2023/10/IW2.0.1_documentation.pdf

Pour les différents niveaux de régionalisation de la phase d'ÉICV (voir les colonnes de la matrice de la Figure 50), 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 3.4). 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 spatialisations des impacts liés à la consommation d'eau, seul cet indicateur est considéré pour ce niveau avancé de spatialisations 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.

Cette section présente le cadre général des analyses effectuées avec les logiciels SimaPro, openLCA et Brightway. Les sections suivantes détaillent l'implémentation du modèle pour l'évaluation du shampoing dans ces trois logiciels, ainsi que les limites et les avantages de chaque logiciel en ce qui concerne la prise en compte de la dimension spatiale en ACV.

5.5 Modélisation du système avec SimaPro

La création du modèle dans le logiciel SimaPro ne requiert pas, en principe, des traitements particuliers qui diffèrent d'autres modélisations. L'utilisation d'ecoinvent 3.9.1 comme base de données pour l'arrière-plan implique que certains flux élémentaires sont déjà spatialisés dans les processus, notamment ceux qui touchent à l'eau. Si d'autres flux d'eau sont à rajouter en avant-plan, il faut tenir compte de cette spatialisations et choisir le flux avec la géographie qui correspond.

De plus, dans le cas de l'eau potable (*market for tap water*) utilisée dans notre étude lors du lavage et de son traitement correspondant en fin de vie (*market for wastewater treatment*), des processus régionalisés pour la France ont été créés à partir de processus déjà existants dans la base de données pour la Suisse. Dans ces processus, seuls l'entrant d'électricité et les flux élémentaires touchant l'eau (ex : le flux *water, lake, CH* a été remplacé par *water, lake, FR*) ont été adaptés pour que, lors du calcul des résultats d'impact spatialisés, ces éléments soient considérés à la géographie qui leur correspond.

5.5.1 Méthodologie de régionalisation des impacts

Pour SimaPro, la méthode IMPACT World+, qui inclut plusieurs catégories avec des FC régionalisés a été utilisée. Les résultats ont été calculés à différents niveaux de résolution spatiale :

- **ICV non régionalisé + ÉICV avec FC globaux** : les flux élémentaires ne sont pas spatialisés et les FC ne sont pas régionalisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut);
- **ICV régionalisé + ÉICV avec FC globaux** : les flux élémentaires ne sont pas spatialisés et les FC ne sont pas régionalisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut);
- **ICV régionalisé+ ÉICV avec FC régionalisés** : les flux élémentaires des grands contributeurs sont spatialisés et les FC sont régionalisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut);
- **ICV régionalisé (+ spatialisé à l'échelle native) + ÉICV avec FC régionalisé natif**: les flux élémentaires des grands contributeurs sont spatialisés à l'échelle native et les FC régionalisés natifs sont utilisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut).

Tel que mentionné à la section 3.4.1.1, une partie des catégories d'impact sont régionalisées dans IMPACT World+, or son implémentation dans SimaPro n'est pas compatible pour toutes les catégories

puisque les bases de données, notamment ecoinvent 3.9.1, n'incluent pas des flux spatialisés pour les substances qui contribuent à toutes ces catégories. Le Tableau 17 montre parmi les catégories incluses dans IMPACT World+ (dans sa version 2.01 Expert), les catégories régionalisées et les catégories régionalisées dont l'inventaire présente des flux spatialisés. Il est à noter que les catégories régionalisées par archétype, tels que les impacts toxiques, ne sont pas considérées dans l'analyse.

Tableau 17 : Catégories incluses dans IMPACT World+ 2.0.1 expert avec le niveau de régionalisation des FC et sa compatibilité avec les flux élémentaires de la base de données ecoinvent 3.9.1 dans SimaPro

Catégorie d'impact	Unités	Impact Régionalisé	Flux spatialisés (ecoinvent 3.9.1)
Climate change, human health, long term	DALY		
Climate change, human health, short term	DALY		
Human toxicity cancer, long term	DALY		
Human toxicity cancer, short term	DALY		
Human toxicity non-cancer, long term	DALY		
Human toxicity non-cancer, short term	DALY		
Ionizing radiation, human health	DALY		
Ozone layer depletion	DALY		
Particulate matter formation	DALY	✓*	
Photochemical oxidant formation	DALY		
Water availability, human health	DALY	✓	✓
Climate change, ecosystem quality, long	PDF.m2.yr		
Climate change, ecosystem quality, short	PDF.m2.yr		
Freshwater acidification	PDF.m2.yr	✓	
Freshwater ecotoxicity, long term	PDF.m2.yr		
Freshwater ecotoxicity, short term	PDF.m2.yr		
Freshwater eutrophication	PDF.m2.yr	✓	
Ionizing radiation, ecosystem quality	PDF.m2.yr		
Land occupation, biodiversity	PDF.m2.yr	✓	
Land transformation, biodiversity	PDF.m2.yr	✓	
Marine acidification, long term	PDF.m2.yr		
Marine acidification, short term	PDF.m2.yr		
Marine eutrophication	PDF.m2.yr	✓	
Terrestrial acidification	PDF.m2.yr	✓	
Thermally polluted water	PDF.m2.yr	✓*	✓
Water availability, freshwater ecosystem	PDF.m2.yr	✓*	✓
Water availability, terrestrial ecosystem	PDF.m2.yr	✓*	✓
* Catégories avec FC régionalisés mais utilisant une valeur globale unique			

Deux catégories des 11 contribuant à l'aire de protection *Human health* sont régionalisées, mais seulement une (*Water availability, human health*) a un inventaire avec des flux spatialisés compatibles. Cependant, dans le cas de la catégorie *Particulate matter formation*, la régionalisation des FC est « artificielle » puisque même si des FC existent pour de nombreuses géographies, ils ont tous la même valeur du FC global. Pour l'aire de protection *Ecosystems quality*, neuf des 16 qu'y contribuent sont régionalisés, mais seulement trois, celles touchant aux impacts dans l'eau, ont un inventaire avec des flux spatialisés. Pour ces trois catégories, la régionalisation des FC est aussi « artificielle ». Cette

régionalisation répond à la spatialisation des flux dans ecoinvent. En effet, comme les flux de prélèvement et émission d'eau sont spatialisés, il faut un FC qui correspond à chaque flux pour que leur contribution au score final soit calculée, mais les valeurs des FC sont toutes les mêmes.

5.5.2 Analyse des résultats globaux de l'ACV

Pour le premier calcul des résultats deux niveaux de résolution sont comparés :

- **ICV non régionalisé + ÉICV avec FC globaux;**
- **ICV régionalisé + ÉICV avec FC globaux.**

La Figure 53 montre la contribution par catégorie d'impact aux scores d'impact totaux des deux aires de protection. Pour l'aire de protection *Human health*, les catégories *Water availability, human health* et *Climate change, human health, long term* sont les principaux contributeurs au score total. Pour l'aire de protection *Ecosystems quality*, les catégories *Climate change, ecosystem quality, long term*, *Freshwater ecotoxicity, long term* et *Land transformation, biodiversity* sont les principales contributrices au score total avec des contributions de 26 %, 31 % et 21 % respectivement.

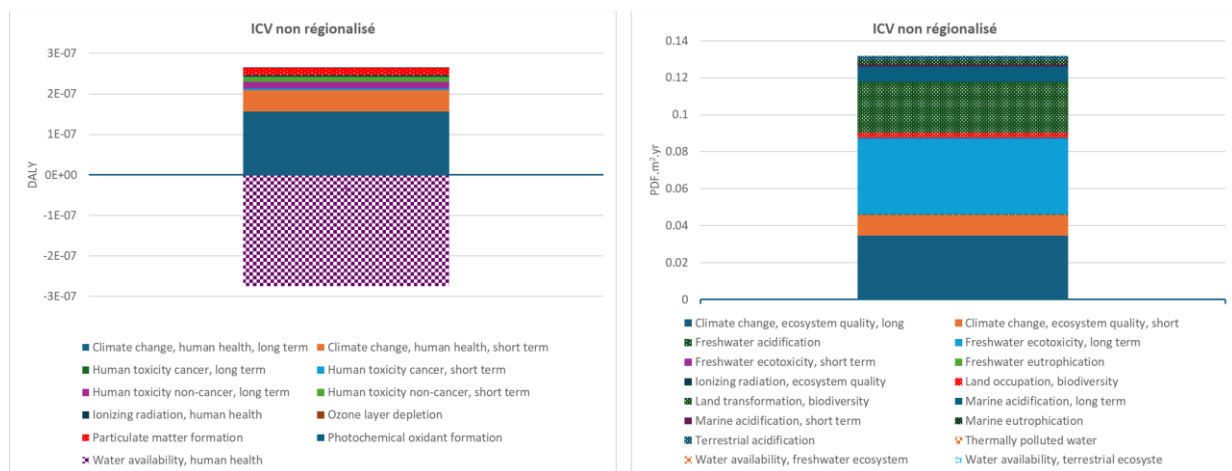


Figure 53. Analyse de contribution des impacts liés aux aires de protection, classées par catégories d'impacts endpoint : (a) Human health et (b) Ecosystems quality, selon la méthode IMPACT World+ pour l'implémentation de base dans SimaPro avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires. Les catégories avec un motif quadrillé indiquent des catégories avec des FC régionalisés et flux d'ICV spatialisés. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.

La Figure 54 présente les mêmes résultats par étape de cycle de vie. Les étapes d'utilisation et de production du shampoing apparaissent comme les étapes les plus contributrices pour les deux aires de protection. Pour l'aire de protection *Human health*, la contribution de la catégorie *Water availability, human health* provient majoritairement de l'étape d'utilisation. La modélisation de la consommation d'eau de cette étape utilise dans cette analyse un marché moyen européen, ce qui pourrait avoir un impact notablement sur les résultats.

Pour l'aire de protection *Ecosystems quality*, la catégorie *Climate change, ecosystem quality, long term* apparaît comme le principal contributeur au score total pour l'étape d'utilisation du shampoing. Cependant, les processus qui contribuent le plus à ce résultat, notamment la production d'électricité et de chaleur (adaptés de base au contexte français), ne sont pas affectés par la régionalisation plus précise de l'inventaire, donc a priori, ces résultats ne changeront pas. La contribution à la catégorie *Freshwater ecotoxicity, long term* est dominée par le processus de traitement d'eau dans l'étape d'utilisation. Étant donné que ce processus est affecté par la régionalisation de l'inventaire, les résultats pourront changer avec l'augmentation de la précision du dit inventaire. D'autre côté, la catégorie *Land transformation, biodiversity* apparaît comme le principal contributeur au score total de l'étape de

production du shampoing. Étant donné la disponibilité de FC régionalisés et que le principal contributeur pour cette catégorie dans cette étape est l'étape agricole pour la production de glycérine, tant la régionalisation de l'inventaire que la spatialisation des flux pourraient influencer le résultat final.

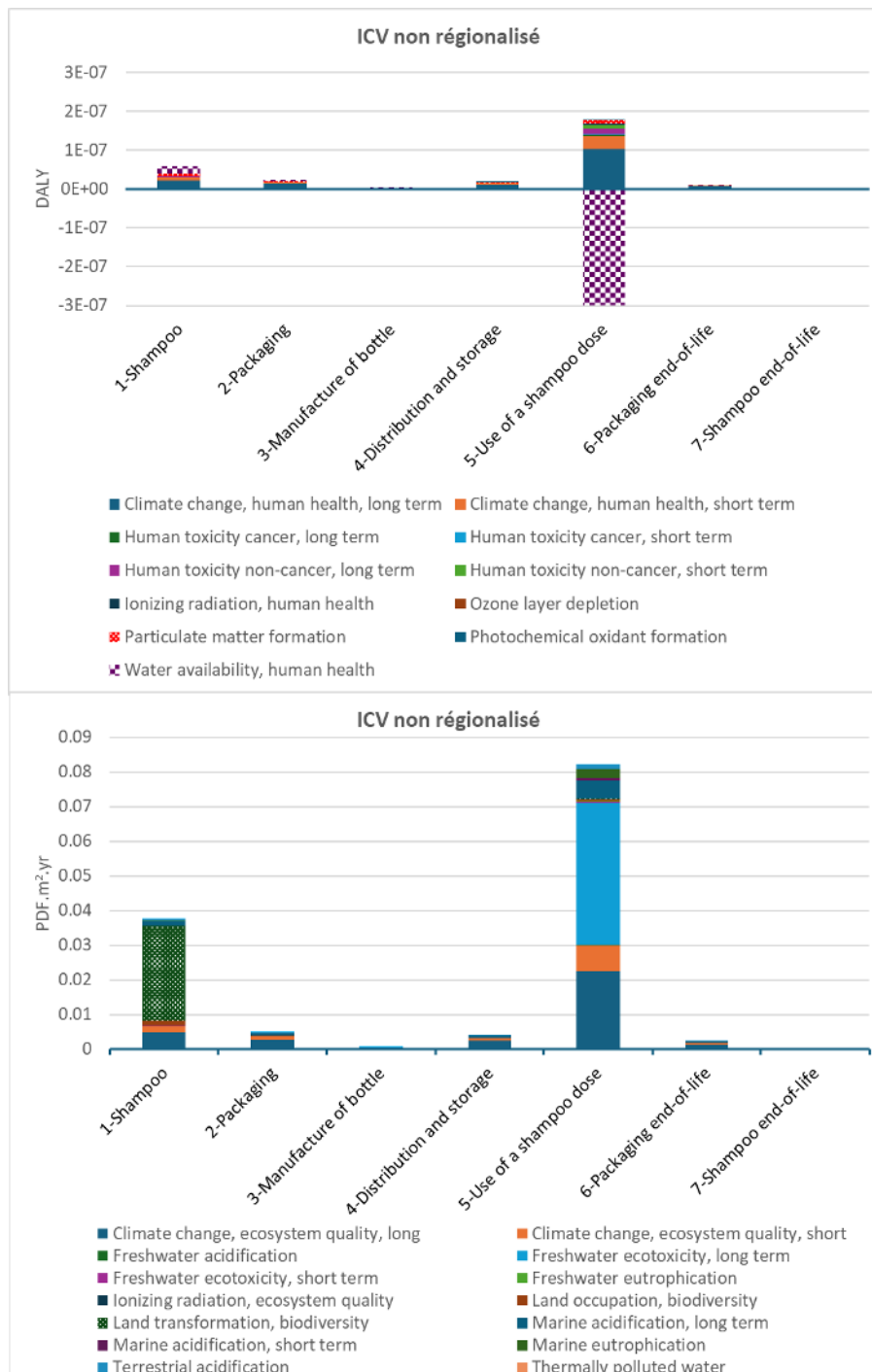


Figure 54. Contribution par catégorie des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire non-régionalisé pour la méthode IMPACT World+. Les catégories avec un motif quadrillé indiquent des catégories avec des FC régionalisés et flux d'ICV spatialisés. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.

5.5.3 Analyse des résultats avec ICV régionalisé

La Figure 55 présente la contribution des étapes du cycle de vie aux aires de protection avec un inventaire régionalisé pour la méthode IMPACT World+. À la suite de la régionalisation de l'inventaire,

la contribution de l'étape d'utilisation apparait toujours comme la principale contributrice pour l'aire de protection *Human health*, mais pour *Ecosystems quality* la production du shampooing est devenue la principale étape contributrice.

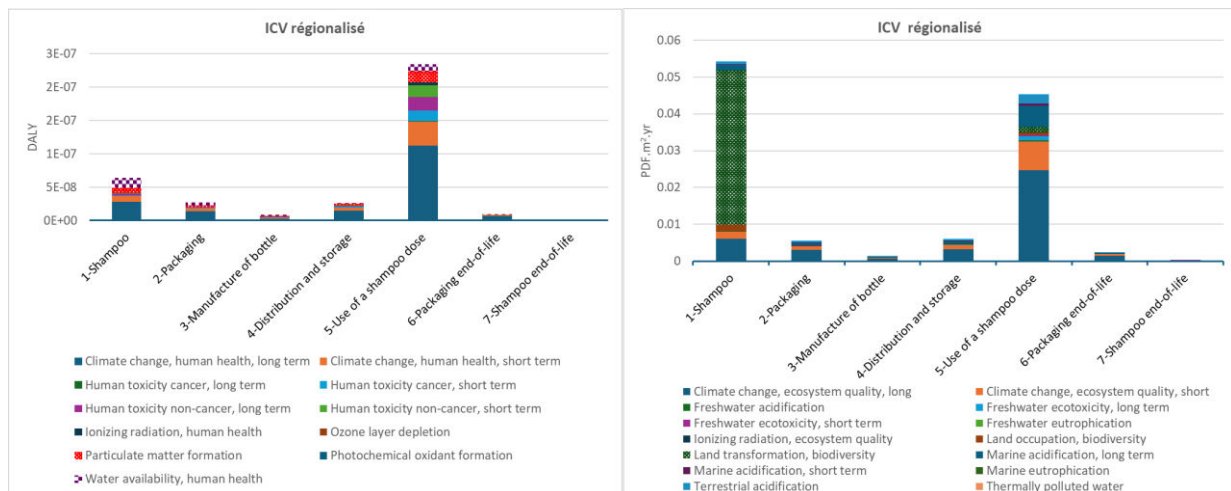


Figure 55 : Contribution des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire régionalisé pour la méthode IMPACT World+. Les catégories avec un motif quadrillé indiquent des catégories avec des FC régionalisés et flux d'ICV spatialisés. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.

Au niveau de la contribution des catégories d'impact aux scores totaux pour les aires de protection, contrairement aux résultats du calcul avec l'inventaire non-régionalisé, la catégorie d'impact (avec différenciation spatiale) *Water availability, human health*, n'est plus un des principaux contributeurs. En effet, l'utilisation d'une région plus large comme l'Europe résultait en l'utilisation d'un FC plus élevé que dans le cas de la France. En substituant les flux d'eau entrant et sortant contenus dans les processus par les flux spécifiques pour la France, des FC plus précis sont aussi utilisés.

Dans le cas de l'indicateur *Qualité des écosystèmes*, l'utilisation d'un inventaire plus régionalisé résulte en une augmentation de la contribution du score des catégories associées à la transformation et l'utilisation des terres dans l'étape de production du shampooing, avec une contribution relative au score total de 38% et une diminution de la catégorie *Freshwater ecotoxicity, long term*, qui passe d'une contribution relative de 31% à une contribution quasi-nulle.

La Figure 56 présente le ratio des scores par catégorie entre le calcul avec ICV non régionalisé et celui régionalisé. Les ratios supérieurs à 1 indiquent que la régionalisation de l'inventaire a pour effet l'augmentation des scores et vice-versa. Les différences de moins de 5% sont considérées équivalentes. En général, la régionalisation de l'inventaire a pour effet une augmentation des scores pour les catégories de l'aire de protection *Human health*, notamment pour la catégorie *Human toxicity cancer, short term*. La seule catégorie qui diminue et affecte notablement le score final est *Water availability, human health*. Les ratios sur l'aire de protection *Ecosystem quality* varient selon la catégorie avec une régionalisation plus précise de l'ICV, notamment pour les catégories *Water availability* et *Land transformation*, avec des ratios d'environ 1.5.

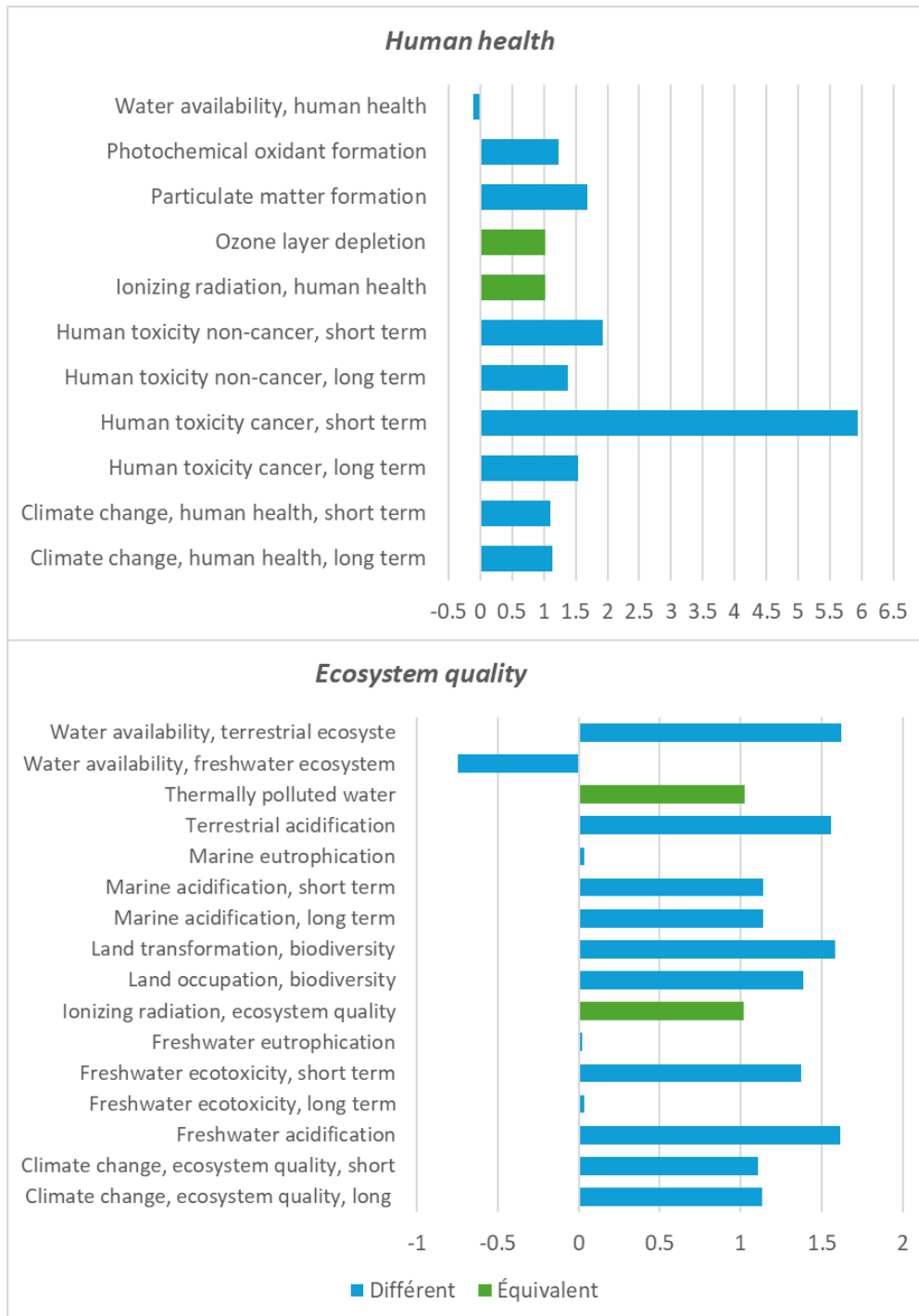


Figure 56. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé à un niveau de régionalisation faible de l'ICV. Le calcul est réalisé avec la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Endpoint et repose sur l'implémentation de SimaPro avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires.

5.5.4 Analyse des résultats avec ÉICV régionalisée

Tel que mentionné dans la section 3.6, plusieurs approches existent pour augmenter la représentativité et robustesse des résultats, comme l'évaluation de la contribution à l'incertitude, mais ces approches ne sont pas disponibles dans SimaPro. L'approche utilisée dans ce cas se base sur une analyse de contribution par processus afin d'identifier les processus qui contribuent le plus dans la production du shampoing et améliorer leur représentativité en conséquence.

La Figure 57 montre l'arbre de processus avec les processus les plus contributeurs pour la catégorie *Land transformation, biodiversity*. Cette catégorie a été choisie par sa forte contribution au score total à l'aire de protection *Ecosystem quality* une fois l'inventaire régionalisé (Figure 56). Étant donné cette contribution et l'existence de FC régionalisés, la spatialisation des flux dans les processus les plus contributeurs permettrait d'augmenter la représentativité des résultats.

La production d'huile de colza brut utilisé pour la production de glycérine apparait comme le principal contributeur au score de cette catégorie (95 % du score total de la catégorie). L'augmentation de la représentativité de ce processus peut passer par la régionalisation de l'inventaire (identification du pays producteur, modes de production, etc.) ou par la spatialisation des flux qui contribuent à cette catégorie. Seule cette deuxième option a été retenue pour cette analyse.

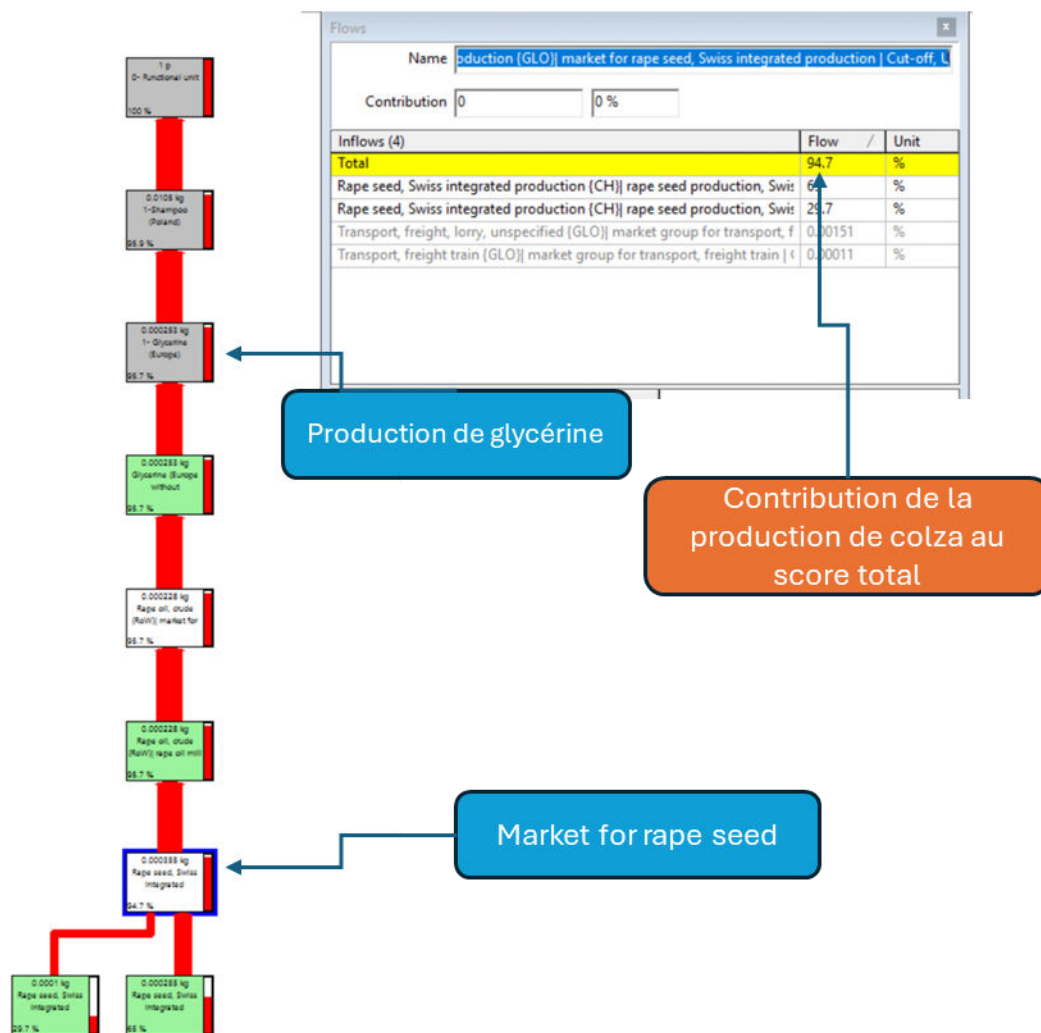


Figure 57 : Arbre de processus SimaPro. Contribution à la catégorie *Land transformation, biodiversity*.

La spatialisation des flux de transformation de terres implique la création de copies de tous les processus allant de l'avant-plan du système jusqu'au processus où l'adaptation doit être faite puisque la structure de SimaPro ne permet pas la modification directe de processus qui appartiennent aux bibliothèques. Cette opération peut augmenter le temps de modélisation de manière notable. L'adaptation consiste à remplacer les flux originaux qui ne sont pas spatialisés et donc utilisent le FC global, par des flux avec le code du pays. Dans ce cas-ci, comme il n'y a pas eu de spatialisation supplémentaire de l'inventaire, les flux du pays par défaut (la Suisse) ont été utilisés. La Figure 58 montre le processus une fois que les flux élémentaires sont spatialisés. Cette opération a été effectuée pour les deux

processus de production de colza qui forment le marché (*Rape seed, Swiss integrated production, intensive CH* et *Rape seed, Swiss integrated production, extensive CH*).

Documentation	Input/output	Parameters	System description
Products			
Outputs to technosphere: Products and co-products			Amount
Rape seed, Swiss integrated production (CH) rape seed production, Swiss integrated production, extensive Cut-off, U spatial			1.0
Add			
Outputs to technosphere: Avoided products			Amount
Add			
Inputs			
Inputs from nature			
	Sub-compartment	Amount	Unit
Carbon dioxide, in air	in air	1.97433117183867	kg
Energy, gross calorific value, in biomass	biotic	24.8400001526	MJ
Occupation, annual crop, non-irrigated, extensive	land	3.3647	m2a
Transformation, from annual crop, non-irrigated, extensive, CH	land	2.6462	m2
Transformation, from pasture, man made, intensive, CH	land	1.0808	m2
Transformation to annual crop, non-irrigated, extensive, CH	land	3.3647	m2
Add			
Inputs from technosphere: materials/fuels			
		Amount	Unit
[thio]carbamate-compound (GLO) market for [thio]carbamate-compound		3.9448E-5	kg
Acetamide-anilide-compound, unspecified (GLO) market for acetamide-anilide-compound		0.00070068	kg
Ammonium nitrate (RER) market for ammonium nitrate Cut-off, U		0.0374680146501317	kg
Ammonium sulfate (RER) market for ammonium sulfate Cut-off, U		0.00099227	kg
Application of plant protection product, by field sprayer (CH) application of plant protection product, by field sprayer Cut-off, U		0.00070813	ha
Combine harvesting (CH) combine harvesting Cut-off, U		0.0003727	
Dinitroaniline-compound (GLO) market for dinitroaniline-compound Cut-off, U		0.00017144	
Drying of bread grain, seed and legumes (CH) drying of bread grain, seed and legumes Cut-off, U		0.068182	
Fertilising, by broadcaster (CH) fertilising, by broadcaster Cut-off, U		0.0011181	
Inorganic nitrogen fertiliser, as N (CH) market for inorganic nitrogen fertiliser, as N Cut-off, U		0.0065767	kg
			Distribution
			SD2 or 2SD
			Min

Flux spatialisés

Figure 58 : Modification de processus dans SimaPro pour augmenter la représentativité via la spatialisation des flux élémentaires.

La Figure 59 présente la comparaison par étape de cycle de vie des scores avant et après raffinement des processus les plus contributeurs. À la suite de cette modification, la contribution au score total de la catégorie *Land transformation, biodiversity* diminue considérablement pour l'étape de production de shampooing, sa contribution relative passe de 42 % à 1 %. Le Tableau 18 montre les valeurs des FC GLO et spécifique de la Suisse des flux spatialisés. Les différences des FC résultent en une diminution des scores pour la catégorie d'impact.

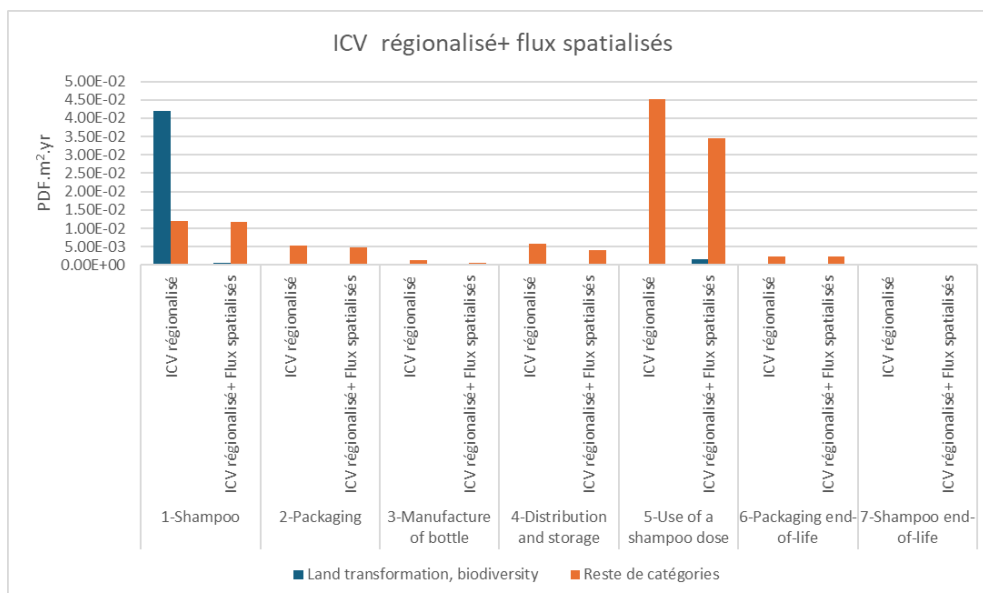


Figure 59: Contribution des étapes du cycle de vie pour l'aire de protection Ecosystem Quality avec l'inventaire régionalisé et spatialisation des flux les plus contributeurs pour la méthode IMPACT World+ version Expert.

Tableau 18 : Comparaison des FC global et spécifique pour la Suisse pour les flux élémentaires spatialisés (PDF.m².yr)

Flux élémentaire	GLO	CH
<i>transformation, from annual crop, non-irrigated</i>	-159	-298
<i>transformation, from pasture, man made, intensive</i>	-39	-140

5.5.5 Analyse de résultats avec FC natifs

Une autre approche pour raffiner des résultats de l'analyse consiste à spatialiser les flux pour utiliser les FC régionalisés natifs. Pour ceci il faut que les données à l'échelle native soient accessibles. Pour cet exemple, la catégorie *Water scarcity* incluse dans la version *Midpoint* d'IMPACT World+ 2.0.1 est utilisée. Le choix de cette catégorie d'impact pour l'analyse se justifie par la disponibilité de FC régionalisés natifs, ce qui permet le calcul des résultats à une échelle plus précise que celle disponible dans SimaPro.

La Figure 60 montre la contribution par étape du cycle de vie à la catégorie *Water scarcity footprint*, qui dans son implémentation dans SimaPro inclut des FC régionalisés par pays. Les contributions de la production du shampoing et de l'utilisation sont respectivement 34 % et 53 % du score total.

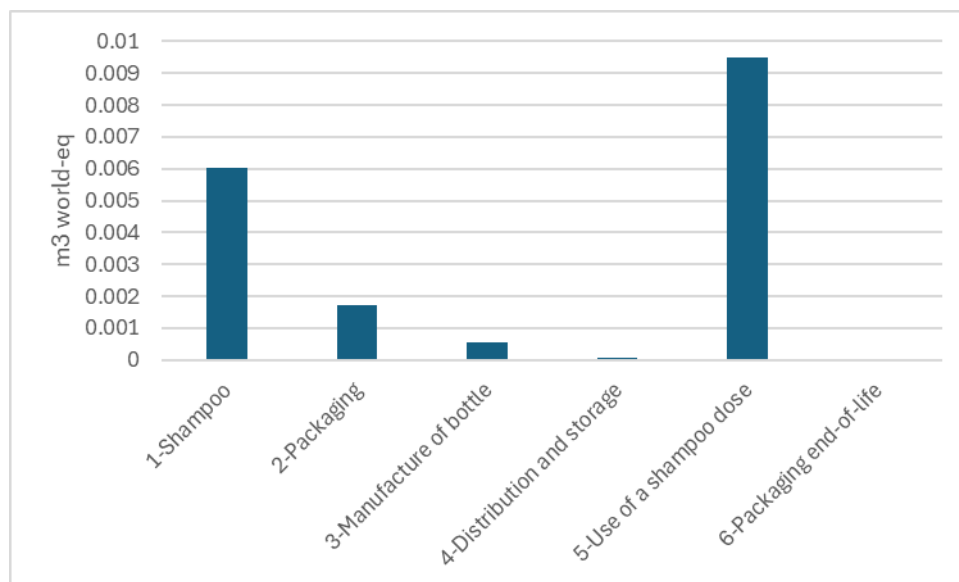


Figure 60 : Contribution à la catégorie *Water scarcity* par étape du cycle de vie. Calculée avec IMPACT World+ 2.0.1 version *Midpoint*.

Bien que le calcul soit spatialisé à l'échelle du pays dans les résultats ci-dessus, la catégorie d'impact étant à une échelle locale, la variabilité dans le pays peut jouer un rôle important dans la robustesse des résultats. Afin de tester cette robustesse, deux emplacements spécifiques pour la phase d'utilisation, qui a lieu en France, ont été choisis : Paris et Montpellier (qui a priori, présente plus de rareté d'eau que la moyenne française).

L'échelle native pour cette catégorie d'impact correspond aux principaux bassins versants. Les FC régionalisés natifs de cette méthode correspondent à ceux de la méthode AWARE, qui sont disponibles sur le site web de WULCA¹⁰. Le Tableau 19 présente les FC pour la région de Paris, la région de Montpellier et la moyenne française utilisée dans la modélisation initiale. La différence entre les FC des deux localisations est d'environ un facteur 15.

¹⁰ <https://wulca-waterlca.org/aware/download-aware-factors/>

Tableau 19 : FC pour la catégorie Water scarcity (AWARE) pour les différentes localisations étudiées (m³ World eq./m³). Les FC natifs sont extraits de la carte Google Earth mise à disposition par les développeurs de la méthode AWARE.

Flux élémentaire	France (FC agrégé)	Paris (FC natif)	Montpellier (FC échelle native)
Annual unknown	8.15	2.8	44.2

L'amélioration de la précision en utilisant des FC natifs implique les mêmes opérations que celles décrites dans la section précédente (utilisation des FC spécifiques dans les processus les plus contributeurs). Additionnement, l'utilisation de FC régionalisé à une autre échelle doit être accompagnée de deux étapes :

- La création de nouveaux flux spatialisés avec un nom spécifique pour l'échelle native (Figure 61).
- La création d'une copie de la méthode d'ÉICV pour inclure les FC correspondant à la région de l'échelle native (Figure 62).

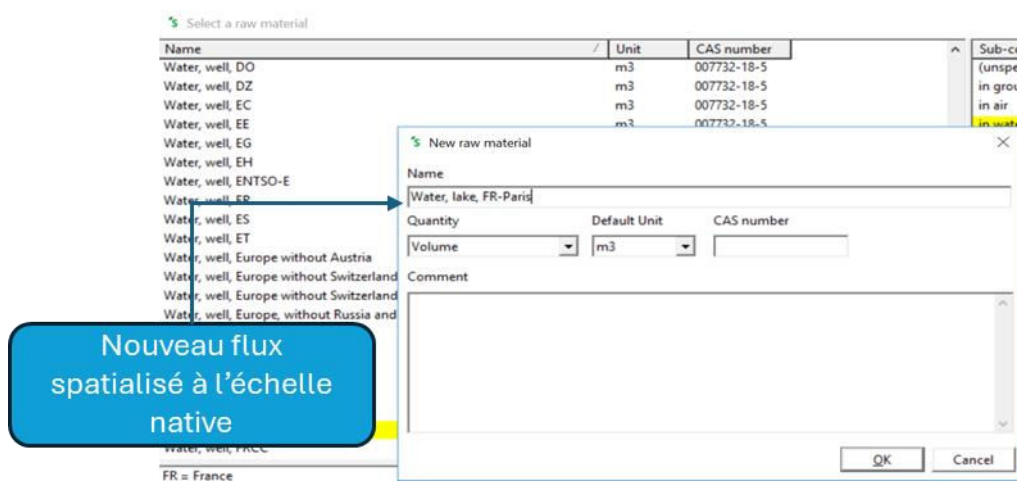


Figure 61 : Création dans SimaPro d'un nouveau flux élémentaires spatialisés pour l'extraction d'eau dans la région de Paris.

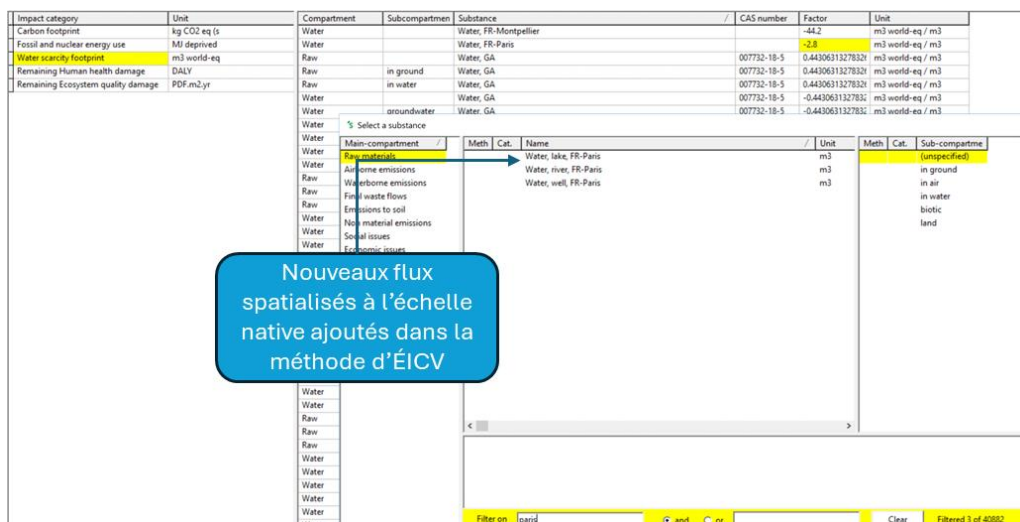


Figure 62 : Ajout des nouveaux FC régionalisés natifs à une copie de la méthode IMPACT World+ dans SimaPro.

La Figure 63 montre la comparaison des résultats pour la catégorie *Water scarcity* à l'échelle du pays et à l'échelle native pour les deux locations sélectionnées. En général, les résultats ne changent que pour l'étape d'utilisation, où l'utilisation des processus régionalisés de production et traitement d'eau sont utilisées majoritairement. Pour le cas de Paris, le score est d'un tiers de celui de la moyenne

française avec un score négatif pour l'étape d'utilisation. Dans le cas de Montpellier le score augmente d'un facteur 10 par rapport à la moyenne du pays pour l'étape d'utilisation, ce qui montre la pertinence d'utiliser des échelles natives pour les principaux contributeurs dans les cas où la variabilité de l'agrégation est haute.

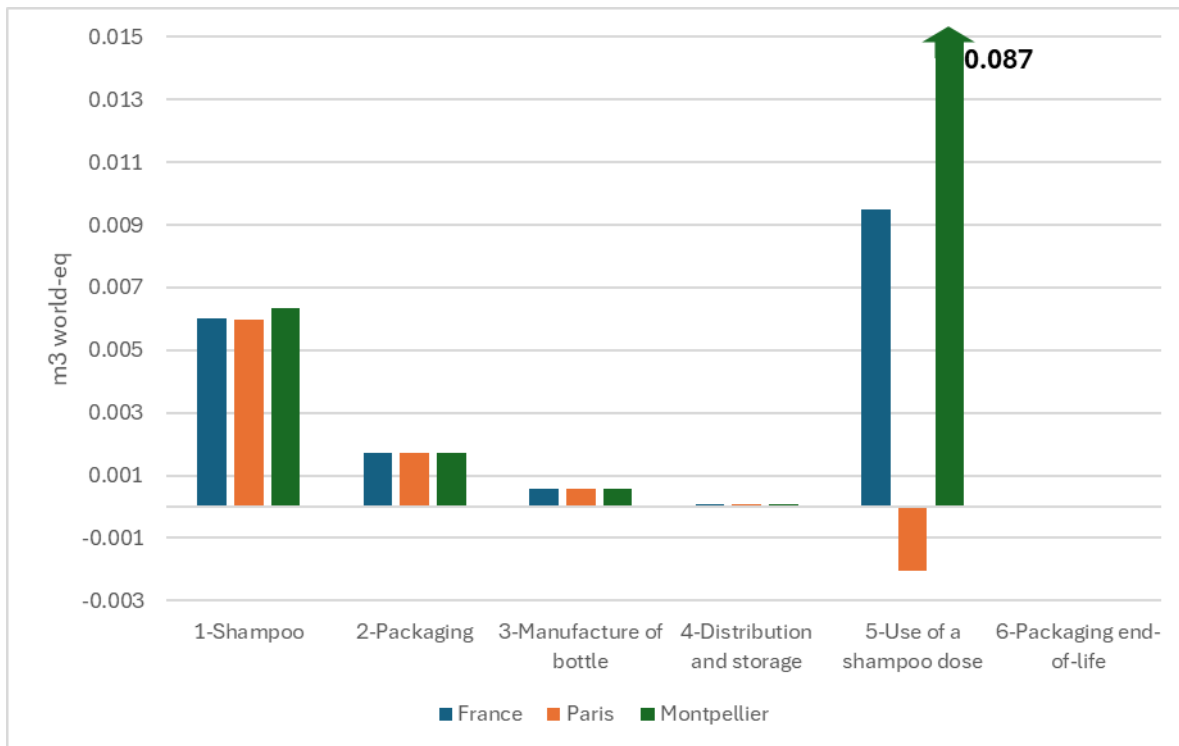


Figure 63 : Résultats par étape du cycle de vie pour la catégorie Water scarcity à l'échelle du pays et à l'échelle native (Paris et Montpellier). Calculé avec IMPACT World+ 2.0.1 version Midpoint.

Il est à souligner que cette approche dans SimaPro ne permet pas de calculer de nouveaux FC à une autre échelle d'agrégation. L'utilisation de FC agrégés à une autre échelle ne pourrait être faite que si l'agrégation est faite au préalable et ensuite les FC sont intégrés comme les FC régionalisés natifs de l'exemple.

5.5.6 SimaPro Flow

Le calcul des résultats avec la version online de SimaPro permet le calcul de scores d'impact spatialisés, mais le niveau de développement de cet outil n'est pas encore suffisant : l'option de calcul régionalisé et détaillé, n'est disponible pour ecoinvent 3.9.1 et la spatialisation de l'inventaire ne concerne que les flux d'eau, alors que parmi les méthodes d'impact disponibles il y a d'autres catégories avec des FC régionalisés tel qu'illustré par la Figure 64.

Substance	Geography	Compartment	Sub Compartment	Characterization factor	Unit		
Fertiliser, ...	Unspecified	Emissions...	(unspecifi...	1.759e-13	PDF.year / ...	Edit	...
Manure, a...	Unspecified	Emissions...	(unspecifi...	1.759e-13	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphate	Unspecified	Emissions...	(unspecifi...	5.804e-14	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphori...	Unspecified	Emissions...	(unspecifi...	5.628e-14	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Kyrgyzstan	Emissions...	(unspecifi...	2.931e-14	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Kyrgyzstan	Emissions...	(unspecifi...	1.533e-14	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Myanmar	Emissions...	(unspecifi...	2.165e-13	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Sri Lanka	Emissions...	(unspecifi...	1.499e-12	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Monteneg...	Emissions...	(unspecifi...	4.521e-14	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Saudi Ara...	Emissions...	(unspecifi...	2.457e-15	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Syrian Ara...	Emissions...	(unspecifi...	7.745e-14	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Bosnia an...	Emissions...	(unspecifi...	9.189e-14	PDF.year / ...	Edit	...
Phosphorus	Suriname	Emissions...	(unspecifi...	4.221e-13	PDF.year / ...	Edit	...

Figure 64 : FC régionalisés pour la catégorie Freshwater eutrophication de la méthode ÉICV LC-IMPACT dans SimaPro flow.

En outre, la capacité d'analyse et d'itération des calculs est très limitée. En effet, seuls les processus d'avant-plan peuvent être modifiés et les processus de la base de données ne peuvent être copiés. Ceci implique que les modifications visant à améliorer la représentativité géographique et la spatialisation ne peuvent être effectuées que si les principaux contributeurs sont dans l'avant-plan. Le niveau de développement de ce logiciel ne permet pas encore une utilisation avancée pour raffiner les résultats.

5.5.7 Principales conclusions

Le logiciel SimaPro offre des éléments intéressants pour la prise en compte des caractéristiques géographiques lors de la modélisation d'une ACV. L'intégration de ecoinvent dans le logiciel 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 chaînes 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.

5.6 Modélisation du système avec openLCA

Comme pour le logiciel SimaPro, la création du modèle dans le logiciel openLCA ne requiert pas de traitements particuliers. Tel que mentionné à la section 3.5.2, deux approches sont possibles pour la spatialisation de l'inventaire dans openLCA. Pour chacune, une version différente d'ecoinvent doit être utilisée. Afin de ne pas mélanger les processus avec des flux spatialisés et non-spatialisés, deux bases de données (projets) séparées ont été créées, chacune avec l'une des deux versions d'ecoinvent disponibles.

Dans l'approche avec les flux spatialisés par leur nom, les opérations pour améliorer la représentativité géographique des données sont similaires à celles présentées pour le logiciel SimaPro. Cette approche n'est pas présentée dans cette étude de cas, mais deux différences majeures sont à noter :

- Dans la version contenant des flux spatialisés, cette spatialisation concerne les flux d'eau et d'autres substances telles que l'ammonium et les oxydes d'azote (la Figure 65 montre un exemple de cette spatialisation des flux élémentaires).

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/R...	Uncertai...	Avoide...	Provider	Data
Mercury II	Emission to soil/a...	1.3580...	kg		lognor...			(2; 2;
Mercury II	Emission to water/...	3.3875...	kg		lognor...			(2; 2;
Mercury II	Emission to water/...	2.8075...	kg		lognor...			(2; 2;
Metaldehyde	Emission to soil/a...	8.3528...	kg		lognor...			(2; 2;
Napropamide	Emission to soil/a...	0.00015	kg		lognor...			(2; 2;
Nickel II	Emission to soil/a...	1.8511...	kg		lognor...			(2; 2;
Nickel II	Emission to water/...	6.6428...	kg		lognor...			(2; 2;
Nitrate	Emission to water/...	0.08952	kg		lognor...			(2; 2;
Nitrogen oxides, CH	Emission to air/lo...	0.00027	kg		lognor...			(2; 2;
Phosphate	Emission to water/...	7.0900...	kg		lognor...			(2; 2;
Phosphate	Emission to water/...	0.00034	kg		lognor...			(2; 2;
Phosphorus	Emission to water/...	3.9155...	kg		lognor...			(2; 2;
rape seed, Swiss integrated production 011:Growing of ...		1.00000	kg	0.1238...	none			
Tebutam	Emission to soil/a...	0.00035	kg		lognor...			(2; 2;
Water	Emission to air/un...	0.02975	m3		lognor...			(2; 2;
Water, CH	Emission to water/...	0.04718	m3		lognor...			(4; 3;
Water, CH	Emission to water/...	0.01179	m3		lognor...			(4; 3;
Zinc II	Emission to soil/a...	8.4788...	kg		lognor...			(2; 2;
Zinc II	Emission to water/...	8.6612...	kg		lognor...			(2; 2;
Zinc II	Emission to water/...	1.6701...	kg		lognor...			(2; 2;

General information | **Inputs/Outputs** | Administrative information | Modeling and validation | Parameters | Allocation | Social aspects | Impact analysis

Figure 65 : Exemple de flux spatialisés dans un processus ecoinvent dans openLCA.

- Les deux logiciels diffèrent dans la modification des processus d'arrière-plan, tel que présenté à la section 5.5.4. Dans openLCA, les processus contenus dans une base de données peuvent être modifiés directement sans passer par une copie, ce qui permet de réduire le temps de manipulation. Néanmoins, la donnée modifiée s'applique alors à toute la base de données, et la donnée originale est perdue.

Une caractéristique intéressante d'openLCA est la possibilité d'informer sur l'incertitude des FC des méthodes d'ÉICV. Cet aspect pourrait améliorer l'analyse pour déterminer les éléments à raffiner. Cependant, cet aspect n'est pas traité dans cette étude de cas.

Les sections suivantes se concentrent donc sur l'utilisation de la version de la base de données utilisant l'approche géospatiale.

5.6.1 Méthodologie de régionalisation des impacts

Pour openLCA, seule la méthode LC-IMPACT est disponible (en version payante) avec une approche géospatiale. Cette méthode permet de calculer des résultats d'impact régionalisés à partir de cartes avec des FC régionalisés. Le Tableau 20 montre parmi les catégories incluses dans la version utilisée (*All impacts, short term*), quelles catégories ont des FC régionalisés.

Tableau 20 : Catégories incluses dans la méthode LC-IMPACT (version All Impacts, Short Term) avec les catégories avec des FC régionalisés

Catégorie	Unités	Impact Régionalisé (GeoJSON inclus)
Climate change - human health	DALY	
Human toxicity - carcinogenic	DALY	
Human toxicity - non-carcinogenic	DALY	
Ionising radiation	DALY	
Particulate matter formation	DALY	✓
Photochemical ozone formation - human health	DALY	✓*
Stratospheric ozone depletion	DALY	
Water stress - human health (average approach)	DALY	✓
Water stress - human health (marginal approach)	DALY	✓
Mineral resources extraction	Kg ore	
Freshwater ecotoxicity	PDF*m3*d	
Marine ecotoxicity	PDF*m3*d	
Terrestrial ecotoxicity	PDF*m3*d	
Climate change - freshwater ecosystems	PDF*y	
Climate change - terrestrial ecosystems	PDF*y	
Freshwater eutrophication	PDF*y	✓
Marine eutrophication	PDF*y	✓*
Photochemical ozone formation - terrestrial ecosystems	PDF*y	✓
Terrestrial acidification	PDF*y	✓*
Water stress - ecosystems	PDF*y	✓*
Land stress (average approach)	PDF-eq*y	✓
Land stress (marginal approach)	PDF-eq*y	✓
Le fichier GeoJSON n'est pas disponible pour cette catégorie		

Les catégories avec des FC régionalisés partent d'une carte contenant les FC régionalisés natifs. Cette carte contient des informations (notamment les FC mais aussi d'autres informations telles que le code d'identification des bassins versants ou leur surface) sous forme de paramètres. Ces paramètres sont utilisés pour calculer la valeur des FC pour un flux élémentaire en fonction de sa localisation. Comme mentionné précédemment, l'agrégation se fait en fonction de la surface, ce qui n'est pas toujours le paramètre d'agrégation recommandé par les développeurs de méthodes d'ÉICV.

Les étapes pour la configuration de méthodes d'ÉICV à partir de données sont décrites en détail dans le guide d'utilisateur d'openLCA¹¹. Dans l'Annexe 8.4, la configuration pour la méthode AWARE est décrite.

Les résultats ont été calculés à différents niveaux de résolution spatiale :

¹¹ https://greendelta.github.io/openLCA2-manual/advanced_top/regionalized.html

- **ICV non régionalisé + ÉICV avec FC globaux** : les flux élémentaires ne sont pas spatialisés et les FC ne sont pas régionalisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut);
- **ICV régionalisé + ÉICV avec FC globaux** : les flux élémentaires ne sont pas spatialisés et les FC ne sont pas régionalisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut);
- **ICV régionalisé + ÉICV avec FC régionalisés** : les flux élémentaires des grands contributeurs sont spatialisés et les FC sont régionalisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut);
- **ICV régionalisé (+ spatialisé à l'échelle native) + ÉICV avec FC natifs ou agrégés**: les flux élémentaires des grands contributeurs sont spatialisés à l'échelle native et les FC natifs ou agrégés à une autre échelle sont utilisés (sauf dans le cas des flux d'eau, régionalisés par défaut).

5.6.2 Analyse des résultats globaux de l'ACV

Pour le premier calcul de résultats avec openLCA dans son approche géospatiale, deux niveaux de résolution sont comparés :

- **ICV non régionalisé + ÉICV avec FC globaux;**
- **ICV régionalisé + ÉICV avec FC globaux.**

Ce calcul tient compte des spécificités géographiques de l'inventaire, mais n'utilise que les FC globaux pour toutes les catégories. Contrairement au cas de SimaPro ou à la version d'openLCA utilisant l'approche de spatialisation dans le nom des flux, dans ce cas-ci aucun flux élémentaire n'est spatialisé par défaut (comme c'était le cas pour les flux d'eau).

La Figure 66 montre la contribution par catégorie d'impact aux scores d'impact totaux des deux aires de protection. Pour l'aire de protection *Human health*, les catégories *Human toxicity*, *carcinogens*, *Climate change*, *human health*, et *Particulate matter* (PM) sont les principaux contributeurs au score total. Parmi ces trois catégories, seule *Particulate matter* offre des FC régionalisés. Pour l'aire de protection *Ecosystems quality*, la catégorie *Water stress* apparaît comme le principal contributeur avec un 76 % du score total suivi par *Land stress* avec une contribution de 15 %. Les deux catégories offrent des FC régionalisés.

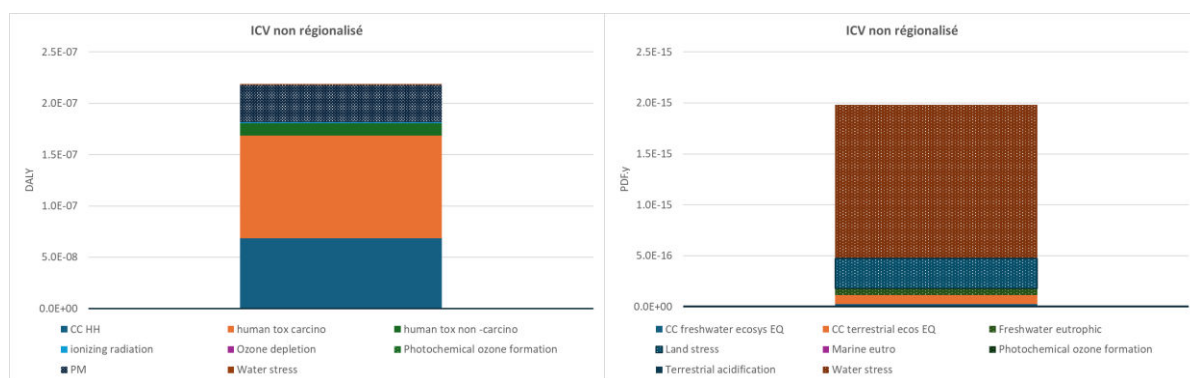


Figure 66. Analyse de contribution des impacts liés aux aires de protection, classées par catégories d'impacts endpoint : (a) *Human health* et (b) *Ecosystems quality*, selon la méthode LC-IMPACT pour l'implémentation de base dans openLCA avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles.

La Figure 67 présente les mêmes résultats par étape de cycle de vie. Les étapes d'utilisation et de production du shampoing apparaissent comme les étapes les plus contributrices pour les deux aires de protection. Pour l'aire de protection *Human health*, la contribution de la catégorie *Human toxicity*, *carcinogens* provient majoritairement de la consommation d'eau à l'étape d'utilisation. La modélisation de la consommation d'eau de cette étape utilise dans cette option un marché moyen européen, ce qui pourrait avoir un impact significatif sur les résultats.

Pour l'aire de protection *Ecosystems quality*, la catégorie *Water stress* apparait comme le principal contributeur au score total pour l'étape d'utilisation du shampooing. Étant donné la disponibilité de FC régionalisés et que le principal contributeur est la consommation d'eau potable, qui n'est pas régionalisé dans cette première modélisation, tant la régionalisation de l'inventaire que la spatialisation des flux pourraient influencer le résultat final. Comme dans le cas de SimaPro et IMPACT World+, la catégorie liée à l'utilisation de terres *Land stress* apparait comme le principal contributeur au score total de l'étape de production du shampooing. La régionalisation de l'inventaire et l'utilisation de FC régionalisés devrait aussi avoir un impact sur le score de cette catégorie.

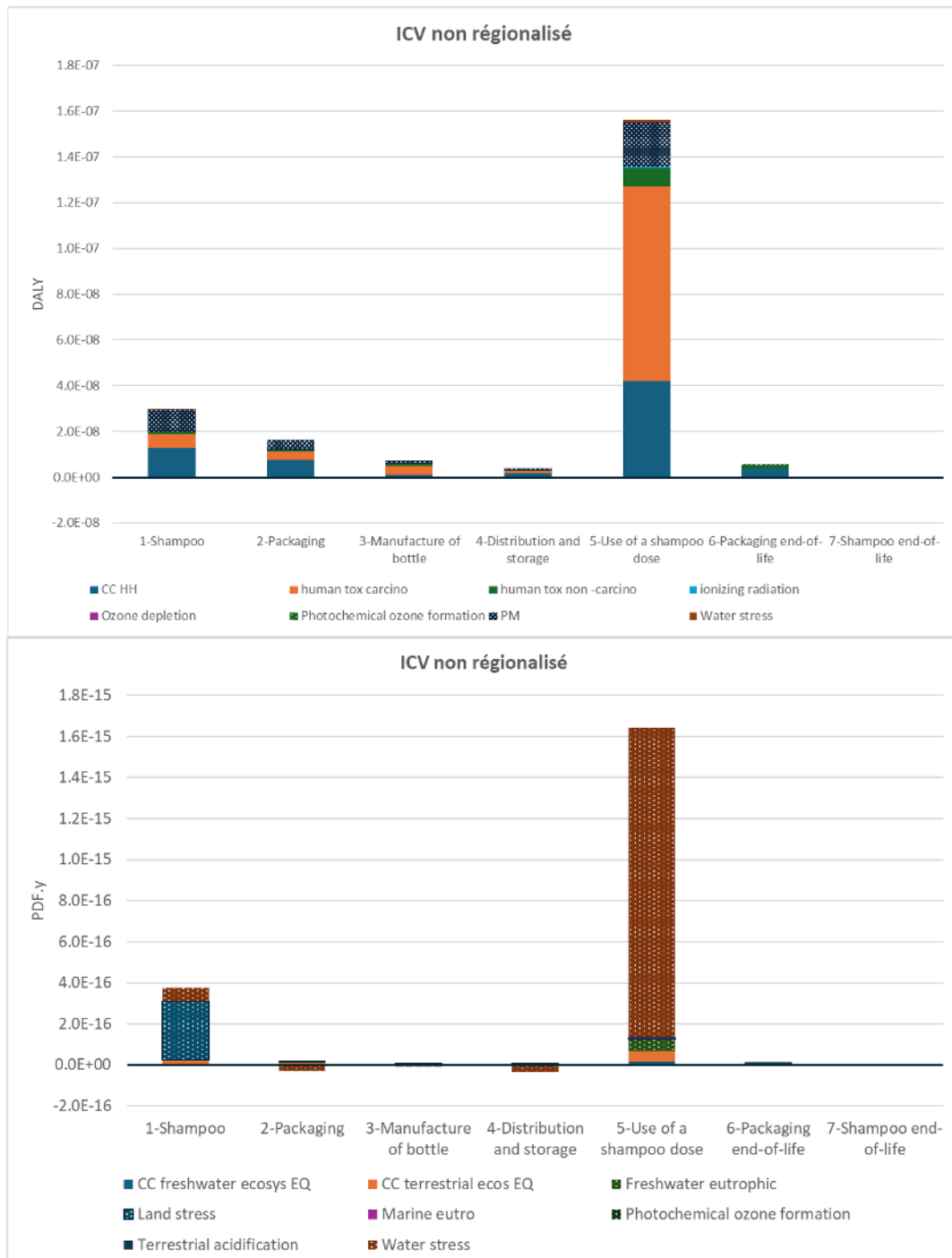


Figure 67. Contribution par catégorie des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire non-régionalisé pour la méthode LC-IMPACT. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.

Même si l'option de calcul régionalisé n'est pas sélectionnée, le calcul des résultats avec openLCA permet de visualiser dans l'onglet *Locations* de la fenêtre de résultats, la localisation des flux élémentaires selon la géographie des processus qui les contiennent. Cette visualisation représente une spatialisation des flux élémentaires selon leur lieu d'émission ou des scores d'impact calculés à partir de ces lieux d'émission. Cependant, elle ne constitue pas un calcul d'impact spatialisé, puisqu'elle n'utilise pas de FC régionalisés lors du calcul des scores d'impact. La Figure 68 montre ces résultats pour l'indicateur *Freshwater eutrophication*. Les résultats peuvent être affichés par flux élémentaire ou par indicateur et deux types de résultats sont présentés : la liste de géographies qui contribuent le plus au score total et une représentation graphique de cette liste. Dans la carte, les plus grands contributeurs (régions émettrices) apparaissent avec une couleur plus foncée. Il est à noter que la contribution de certaines géographies génériques (*GLO, RoW*) ne sont pas incluses dans la carte. Ceci constitue une grande limite de cette visualisation, puisque des nombreux processus dans ecoinvent ont ces géographies génériques.

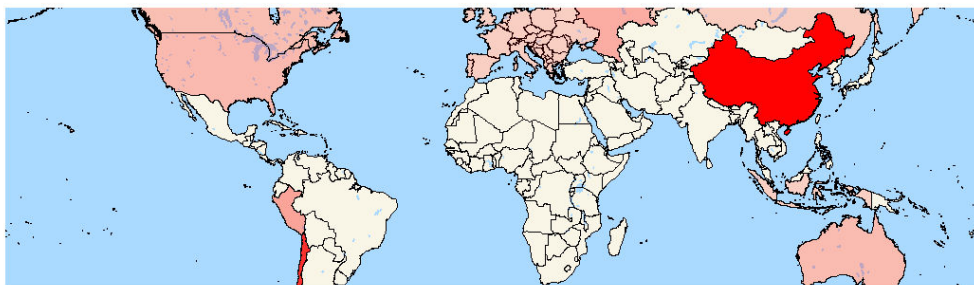
0- Functional unit

Flow 1-2-one - Emission to water/unspecified
 Impact category Freshwater eutrophication Don't show < % Exclude zero entries

Contribution tree for locations

Location	Amount	Unit
> Global - GLO	8.47510675712856E-18	PDF*y
> China - CN	1.6331298302533291E-18	PDF*y
> Rest-of-World - RoW	1.6178956875909936E-18	PDF*y
> Chile - CL	1.2897498010907296E-18	PDF*y
> Peru - PE	5.02927893324861E-19	PDF*y
> United States - US	3.4916956382539015E-19	PDF*y
> Australia - AU	3.47394624545455E-19	PDF*y
> Canada - CA	3.1810339313736355E-19	PDF*y

Map



General information | Inventory results | Impact analysis | Process results | Contribution tree | Grouping | Locations | Sankey diagram | LCIA Checks

Figure 68 : Détails de l'onglet *Locations* pour l'indicateur *Freshwater eutrophication* de la méthode LC-IMPACT calculé avec openLCA avec des FC globaux.

5.6.3 Analyse des résultats avec ICV régionalisé

La Figure 69 présente la contribution des étapes du cycle de vie aux aires de protection avec un inventaire régionalisé pour la méthode LC-IMPACT. À la suite de la régionalisation de l'inventaire, la contribution de l'étape d'utilisation apparaît toujours comme la principale contributrice pour les deux aires de protection. Pour *Human health* les contributions relatives sont très similaires. Contrairement, pour *Ecosystems quality*, la contribution de la catégorie *Water stress*, bien que la plus grande parmi toutes les catégories, est complètement inversée dû à la régionalisation des processus de traitement d'eau et de production d'eau potable.

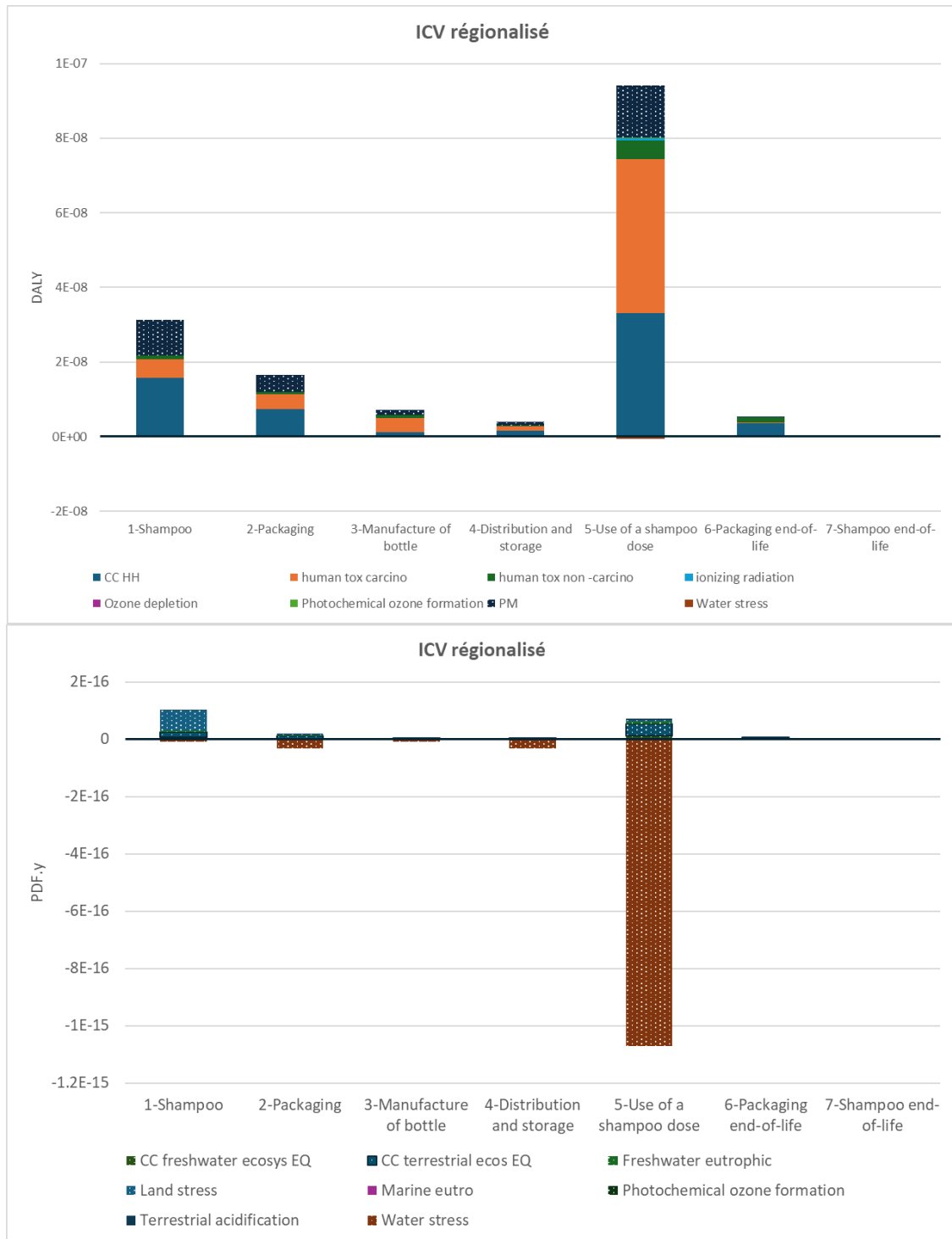


Figure 69. Contribution des étapes du cycle de vie pour les deux aires de protection avec l'inventaire régionalisé pour la méthode LC-IMPACT. Les catégories avec un motif pointillé indiquent les catégories avec des FC disponibles sans flux d'ICV spatialisés.

La Figure 70 présente le ratio des scores par catégorie entre le calcul avec ICV non régionalisé et celui régionalisé. Les ratios supérieurs à 1 indiquent que la régionalisation de l'inventaire a pour effet l'augmentation des scores et vice-versa. Les différences de moins de 5 % sont considérées équivalentes. En général, la régionalisation de l'inventaire a pour effet une diminution des scores pour les deux aires de protection. Les catégories *Water stress* des deux aires de protection présentent des ratios négatifs dus aux scores négatifs de la modélisation avec l'inventaire régionalisé.

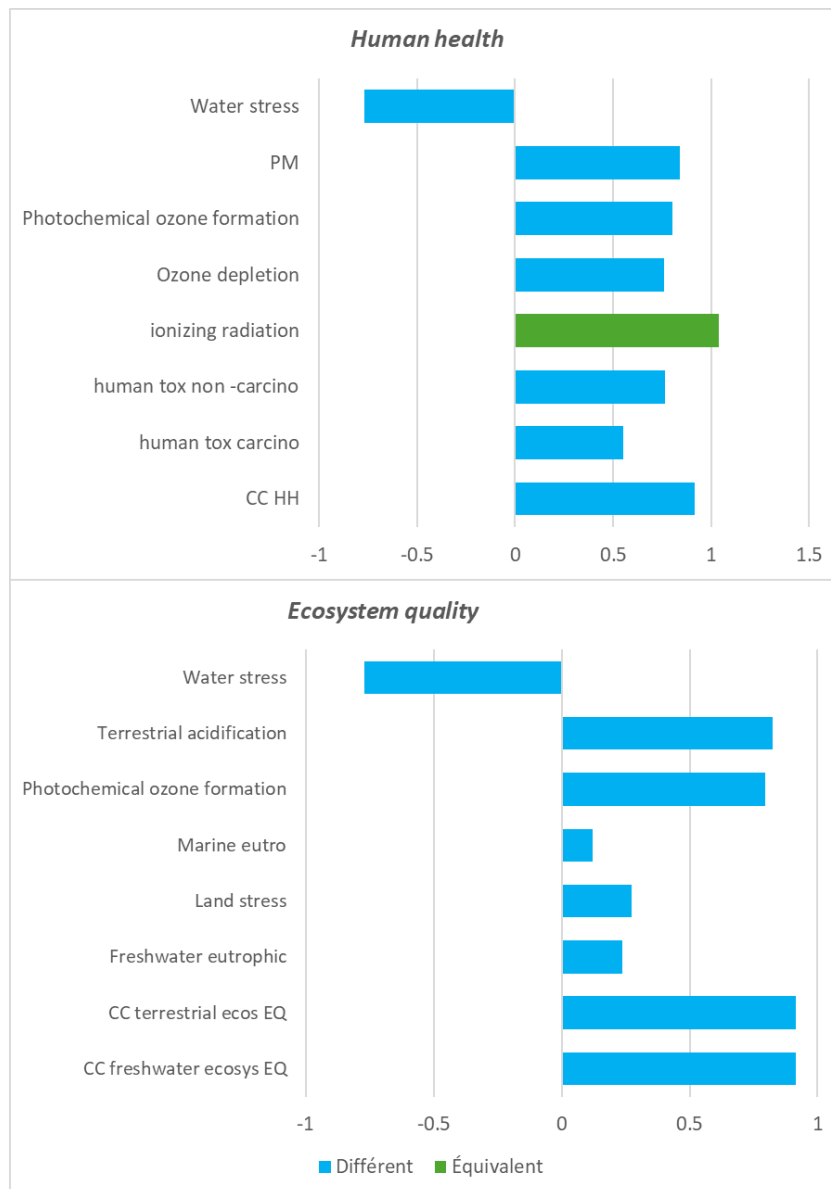


Figure 70. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation moyen (régionalisation de l'ICV et FC non-régionalisés) à un niveau de régionalisation faible de l'ICV et FC non régionalisés. Le calcul est réalisé avec la méthode LC-IMPACT et repose sur l'implémentation d'openLCA avec la base de données ecoinvent 3.9.1.

5.6.4 Analyse des résultats avec ÉICV régionalisée

Afin d'augmenter la représentativité des résultats, l'inventaire est régionalisé et le calcul régionalisé est sélectionné. Ce calcul tient compte des spécificités géographiques de l'inventaire et utilise les FC régionalisés pour toutes les catégories régionalisées.

La Figure 71 présente le ratio des scores par catégorie entre le calcul avec ICV non régionalisé et celui régionalisé. Le calcul de résultats régionalisés modifie notablement les résultats pour l'aire de protection *Human health* et plus concrètement pour les catégories avec des FC régionalisés. Il est notable la différence de résultat pour les catégories *Water stress*, *Land stress* et *Marine eutrophication*, avec des ratios de -0.02, 0.05 et 16.83 respectivement. La variabilité des FC régionalisés est la cause de ces fortes variations. Pour l'aire de protection *Ecosystem quality* les ratios sont moins marqués. Les plus grandes différences ont lieu pour les catégories avec des FC régionalisés (*Water stress*, *Photochemical ozone formation*) alors que les différences pour les autres catégories proviennent uniquement de la régionalisation de l'ICV.

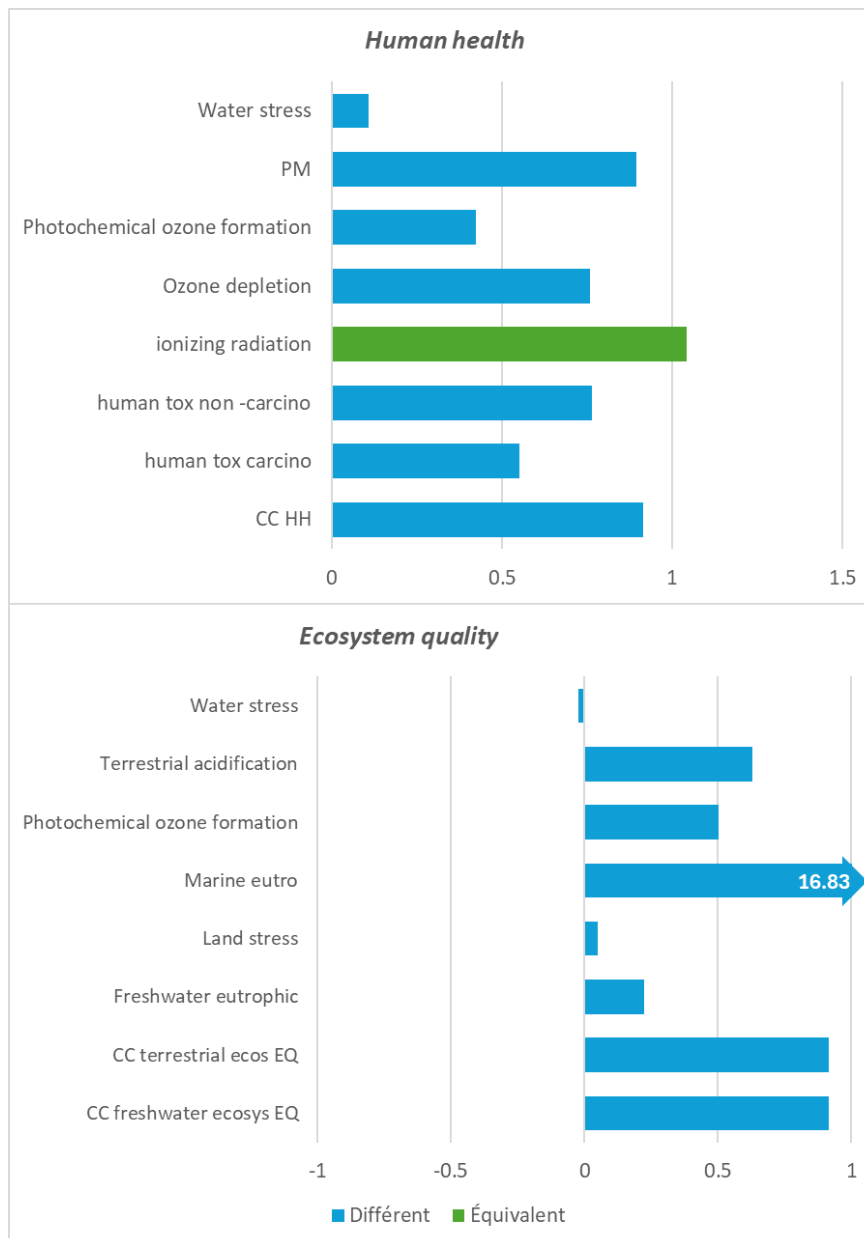


Figure 71. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé (régionalisation de l'ICV et FC régionalisés) à un niveau de régionalisation faible de l'ICV et FC non régionalisés. Le calcul est réalisé avec la méthode LC-IMPACT et repose sur l'implémentation d'openLCA avec la base de données ecoinvent 3.9.1.

La Figure 72 montre ces résultats spatialisés pour *Marine eutrophication* (carte b) avec les résultats obtenus avec les FC globaux (carte a). Les résultats montrent une différence entre les régions les plus contributrices une fois que les FC régionalisés sont appliqués aux flux spatialisés. L'Europe et la Suisse, qui apparaissaient parmi les plus grands contributeurs pour le calcul avec les FC globaux, ne sont plus de grands contributeurs. Des pays comme la Chine et la Malaisie ressortent comme les principales régions contribuant à l'impact. Les FC pour ces régions sont entre 2 et 3 ordres de grandeur plus élevés que le FC global. Ces différences montrent bien la pertinence du calcul d'impacts régionalisés.

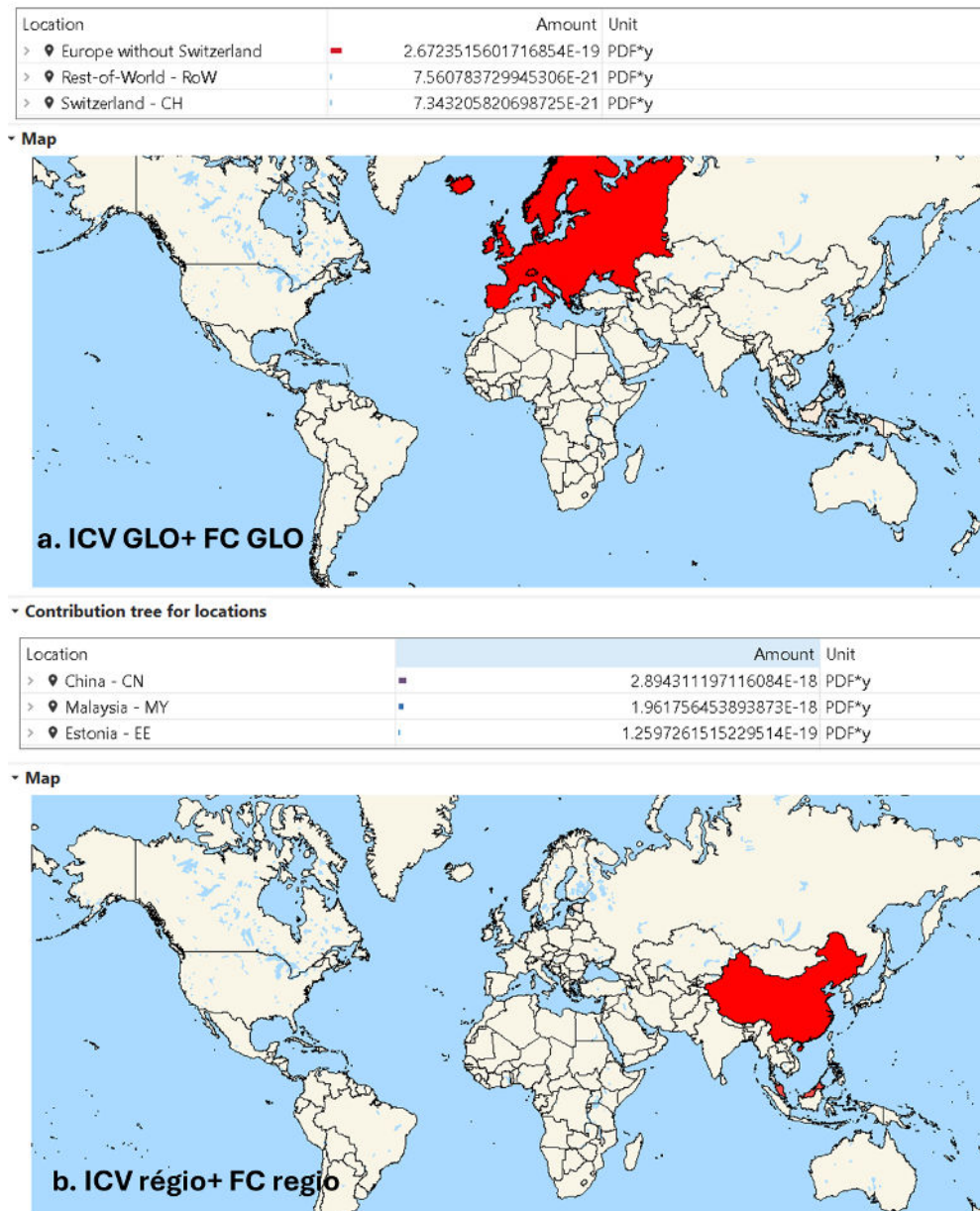


Figure 72 : Comparaison des résultats pour l'indicateur Marine eutrophication de la méthode LC-IMPACT calculé avec openLCA avec des FC globaux (a. FC GLO) et FC régionalisés (b. FC régionalisés).

5.6.5 Analyse de résultats avec FC à résolution spatiale native

L'inclusion de FC régionalisés à une échelle différente de celle offerte par ecoinvent peut être une option pour améliorer la précision des résultats, à condition que les FC régionalisés natifs soient disponibles. Le calcul d'ACV régionalisée avec l'approche géospatiale dans openLCA spatialise par défaut tous les flux élémentaires. Il n'est donc pas nécessaire, contrairement à ce qui a été présenté dans la section 5.5.5, de créer de nouveaux flux spatialisés.

Une version de la méthode AWARE est utilisée ici pour illustrer cette opération. Tel que mentionné dans la section précédente, l'agrégation qu'openLCA fait des FC régionalisés natifs utilise la surface comme base et non la consommation d'eau, tel qu'établi par les développeurs de la méthode. Il n'est actuellement pas possible de modifier ce choix dans le logiciel, il a donc été conservé pour cette étude de cas.

La première étape consiste à définir une nouvelle localisation dans openLCA, qui sera utilisée comme tag géographique pour remplacer le pays dans les processus concernés. Comme dans l'exemple de SimaPro, deux localisations, Paris et Montpellier, ont été créées. La Figure 73 montre l'exemple de création d'une nouvelle localisation pour Paris. En plus de définir le nom et le code, il faut attribuer de l'information géographique à la localisation. Cette étape est cruciale pour le calcul ultérieur des FC agrégés pour la localisation créée.

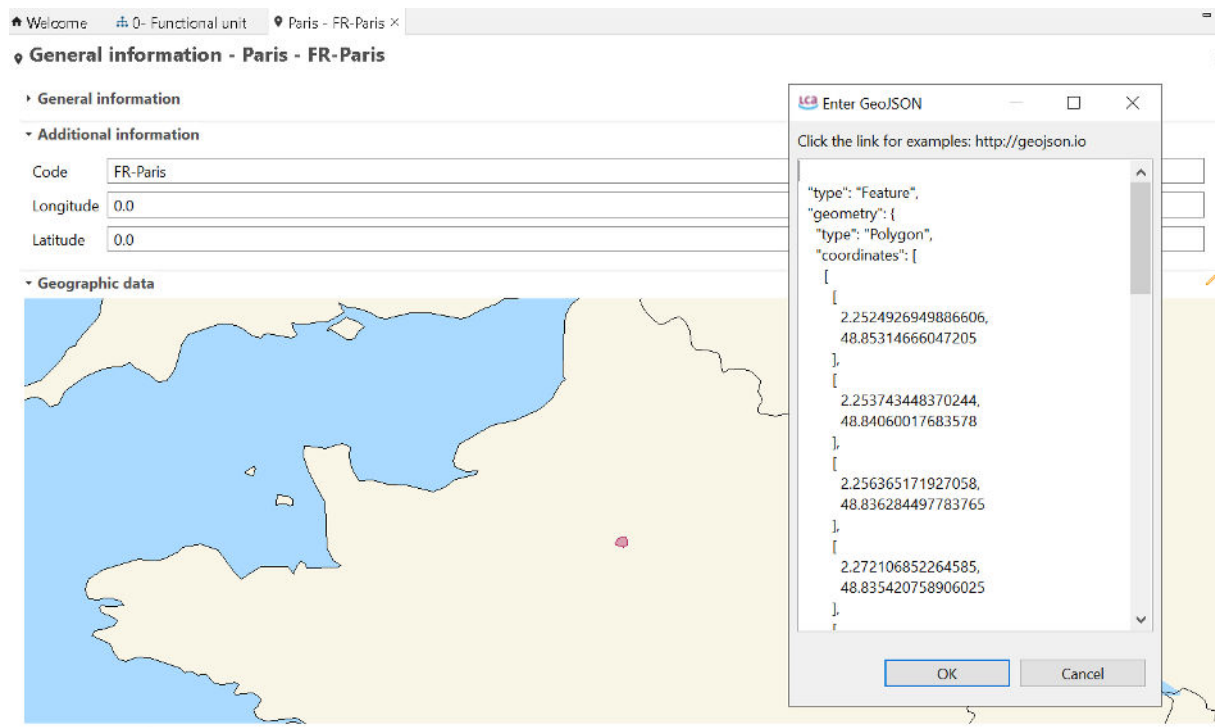


Figure 73 : Création d'une nouvelle localisation dans openLCA.

Cette localisation peut être attribuée ensuite aux processus concernés pour l'amélioration des résultats. La Figure 74 présente un exemple pour le processus de fin de vie du shampoing. La localisation doit être modifiée dans la section *Geography* du processus, qui donne le choix parmi toutes les géographies disponibles par défaut et celles créées par l'utilisateur. Tel que mentionné auparavant, la structure d'openLCA permet de modifier des processus d'avant plan et de la base de données en arrière-plan sans avoir besoin de créer des copies de toute la chaîne de processus. Dans l'exemple de la section 5.5.4, seul le processus de production de colza aurait été modifié avec openLCA. OpenLCA offre aussi la possibilité d'assigner une géographie spécifique aux flux élémentaires d'un processus. Cette option pourrait servir aussi pour des raffinages de la modélisation spécifiques, mais l'approche géospatial, qui assigne une géographie à tous les flux élémentaires rend cette option peu pertinente dans la plupart des contextes.

7-Shampoo end-of-life (France) - FR-Paris ×

General information

Name: 7-Shampoo end-of-life (France)

Category: use/ScoreLCA_spatialisation

Description:

Version: 00.00.002 Last change: 2024-08-15 13:58:38 UUID: c4d508de-0f

Tags: Add a tag use

Infrastructure process:

Create product system Direct calculation Export to Excel

Time

Start date: 2024-08-21

End date: 2024-08-21

Description:

Geography

Location: Paris - FR-Paris ×

General information | Inputs/Outputs | Documentation | Parameters | Allocation | Social aspects | Direct impacts

Figure 74: Assignment d'une nouvelle localisation à un processus dans openLCA.

À la suite de l'adaptation de l'inventaire pour avoir des flux élémentaires à une échelle plus précise, il faut calculer et intégrer dans la méthode d'ÉICV les FC régionalisés pour les nouvelles localisations. Le calcul et intégration se fait tel que décrit dans la section 5.6.1. La Figure 75 montre l'exemple du calcul et de l'intégration de ces nouvelles géographies.

Calculated factors ✕

Merge factors Keep existing Replace existing

Flow	Category	Factor	Unit	Location
Water	Elementary flows/Emissio...	-2.835005240...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water/kg	Elementary flows/Emissio...	-0.002835005...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water/m3	Elementary flows/Emissio...	-2.835005240...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water	Elementary flows/Emissio...	-0.002835005...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water	Elementary flows/Emissio...	-2.835005240...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water	Elementary flows/Emissio...	-0.002835005...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water/m3	Elementary flows/Emissio...	-2.835005240...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water	Elementary flows/Emissio...	-0.002835005...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water/m3	Elementary flows/Emissio...	-2.835005240...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water	Elementary flows/Emissio...	-2.835005240...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water	Elementary flows/Emissio...	-0.002835005...	m3 World eq/...	FR-Paris
Water, cooling, unspecified na...	Elementary flows/Resourc...	44.18435961...	m3 World eq/...	FR-Montpellier
Water, lake	Elementary flows/Resourc...	44.18435961...	m3 World eq/...	FR-Montpellier
Water, process, unspecified n...	Elementary flows/Resourc...	44.18435961...	m3 World eq/...	FR-Montpellier
Water, river	Elementary flows/Resourc...	44.18435961...	m3 World eq/...	FR-Montpellier
Water, turbine use, unspecifie...	Elementary flows/Resourc...	44.18435961...	m3 World eq/...	FR-Montpellier
Water, unspecified natural ori...	Elementary flows/Resourc...	44.18435961...	m3 World eq/...	FR-Montpellier
Water, well	Elementary flows/Resourc...	44.18435961...	m3 World eq/...	FR-Montpellier

Figure 75 : Calcul et intégration des nouveaux FC régionalisés.

Avec toutes ces étapes complétées, le calcul régionalisé peut être refait pour obtenir des résultats à une échelle plus précise et augmenter la représentativité des résultats. La Figure 76 présente la comparaison du score total du système pour la méthode AWARE pour les trois échelles de calcul régionalisé : l'échelle globale, où tous les flux utilisent le même FC GLO, l'échelle agrégée au niveau du pays, et l'échelle native pour la région de Paris, où la localisation de certains processus a été détaillée davantage et des FC à cette plus petite échelle sont utilisés.

La Figure 77 présente la carte des impacts spatialisés pour le scénario de Montpellier. Les différences de couleur sont dues au score total des deux régions les plus contributrices, la France et Montpellier.

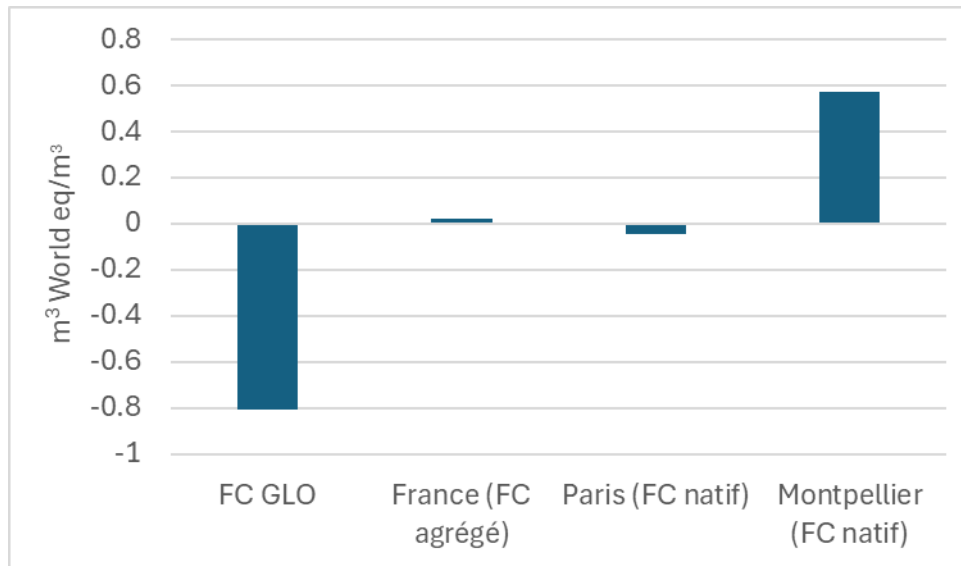


Figure 76 : Comparaison de résultats avec la méthode AWARE pour trois échelles de régionalisation des FC (Globale, agrégée par pays et agrégée à une plus faible échelle).

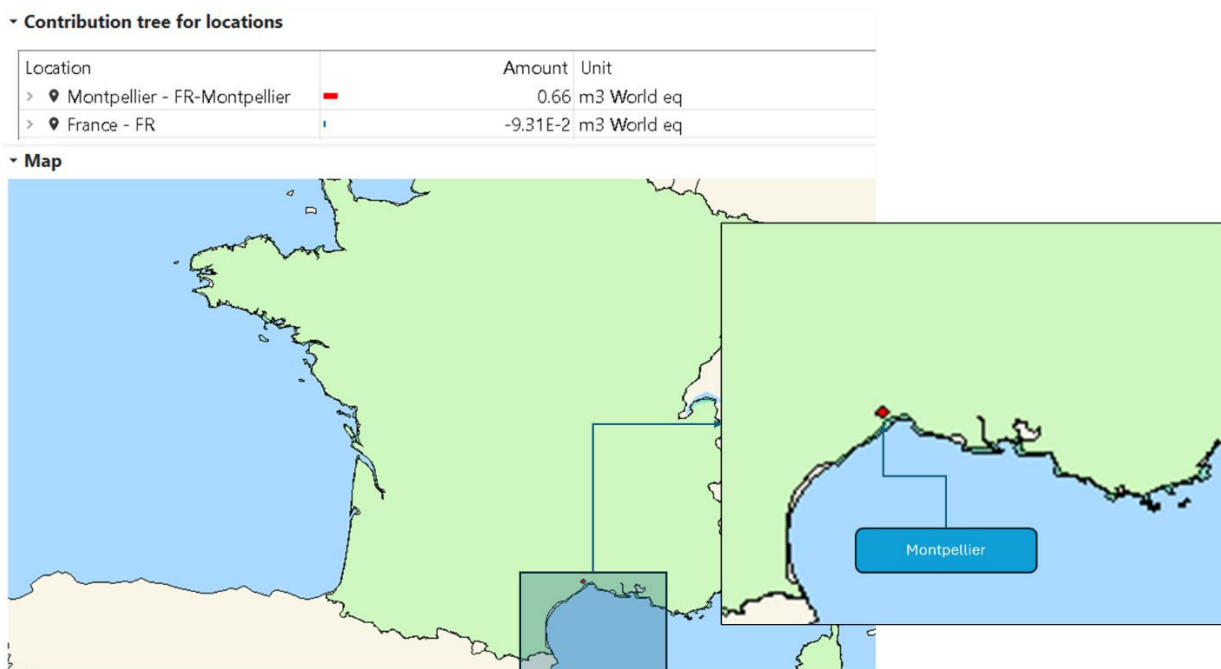


Figure 77 : Carte de résultats pour le scénario de consommation à Montpellier.

5.6.6 Principales conclusions

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 à 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 moins pertinente 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.

5.7 Modélisation du système avec Brightway

Les sous-sections suivantes exposent d'abord la méthodologie générale pour la mise en œuvre du modèle ACV de l'utilisation du shampoing à l'aide du logiciel Brightway. Elles fournissent ensuite une brève description de la méthodologie appliquée à chaque niveau d'analyse, en intégrant divers aspects géographiques, suivie des principaux résultats obtenus.

L'Annexe 8.5 présente les étapes d'installation de Brightway, l'importation de la méthode IMPACT World+ ainsi que l'utilisation de bibliothèques additionnelles telles que Regioinvent et Polyviz. Bien que l'annexe soit intentionnellement brève pour rester dans le cadre de l'étude, des liens pertinents sont fournis afin que le lecteur puisse approfondir les sujets qui l'intéressent.

5.7.1 Méthodologie de régionalisation des impacts

La Figure 78 illustre la manière dont les différents niveaux de régionalisation et spatialisation appliqués à la phase d'ÉICV et d'ICV pour modéliser l'utilisation du shampoing ont été intégrés dans le logiciel Brightway.

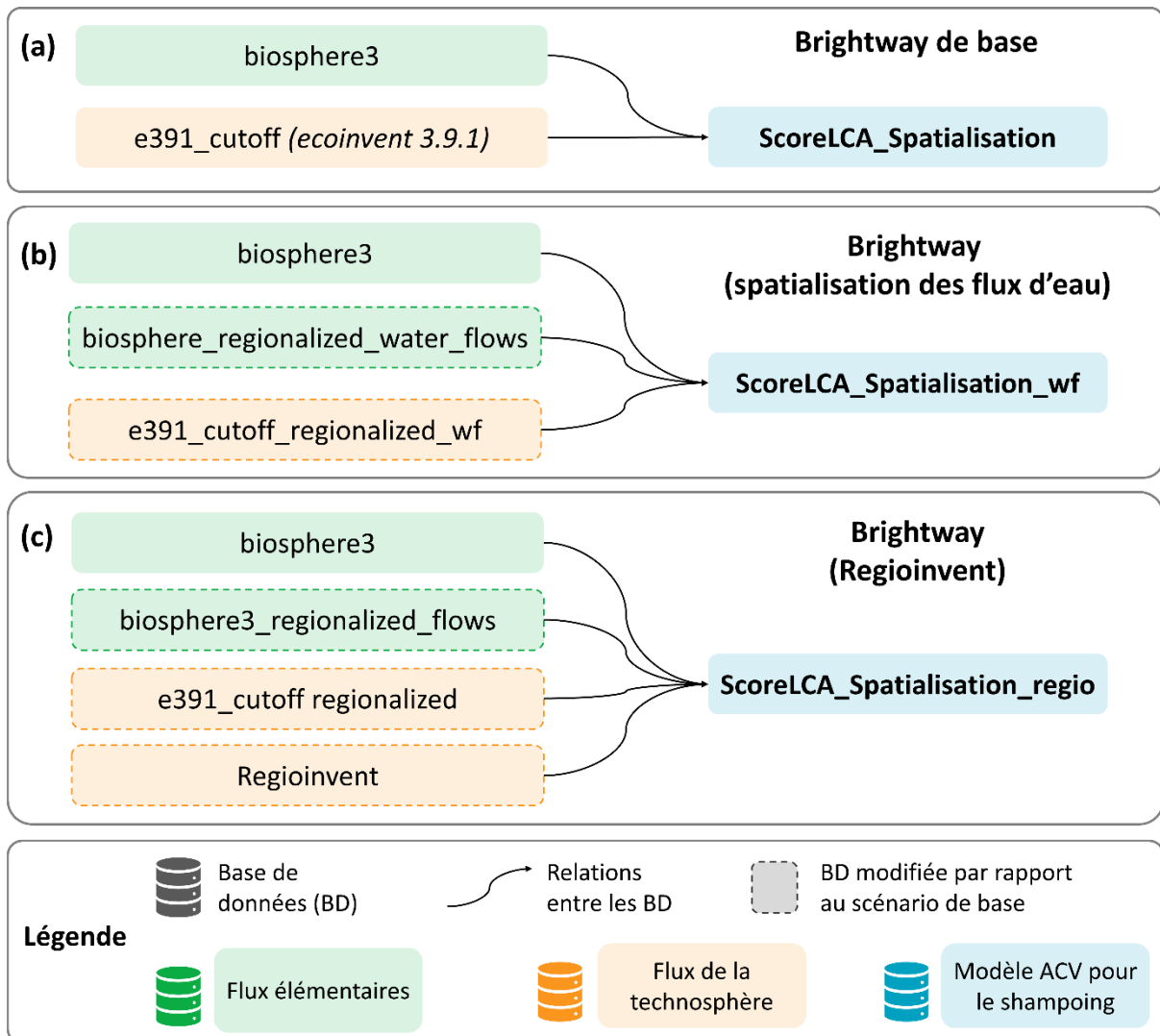


Figure 78. Intégration du modèle ACV pour l'utilisation du shampoing dans le logiciel Brightway 2 : a) Implémentation de base dans Brightway avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires. b) Implémentation avec ecoinvent 3.9.1, incluant la spatialisation des flux d'eau. c) Implémentation avec Regioinvent et ecoinvent 3.9.1, incluant la spatialisation des flux d'eau, de terres, ainsi que des flux associés aux impacts d'acidification et d'eutrophisation.

Dans un premier temps, le modèle ACV de l'utilisation du shampoing a été créé dans un projet Brightway utilisant la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires (voir Figure 78a). Cette première intégration a permis de réaliser les analyses numérotées 1 et 4 dans la matrice présentée à la Figure 50. Comme expliqué à la section 3.5.2.1.3, il s'agit de l'implémentation par défaut des bases de données et des méthodes d'ÉICV dans Brightway.

La Figure 79 illustre que, dans l'implémentation par défaut de la base de données ecoinvent dans ce logiciel, les flux élémentaires ne sont pas spatialement différenciés. Cette observation est illustrée avec l'exemple du processus de marché de l'eau adapté au contexte français (Figure 79a). De plus, la Figure 79b fournit des exemples de flux élémentaires disponibles dans la base de données biosphere3 intégrée à Brightway. On peut y constater que ces flux ne comportent pas d'identification de pays ou de région, ce qui indique leur absence de spatialisation.

Par ailleurs, la Figure 52 démontre que, pour la méthode d'ÉICV EF 3.1, les FC ne sont pas non plus régionalisés, et cette constatation est applicable à d'autres méthodes d'ÉICV dans le cas de l'installation par défaut de Brightway. En conséquence, l'implémentation du modèle pour le shampoing présenté dans la Figure 78a a permis de réaliser à la fois des analyses avec l'ICV et l'ÉICV sans spatialisation.

(a) market for tap water

Edit Activity Description Uncertainty Comments

Name: market for tap water
 Location: FR
 Database: ScoreLCA_Spatialisation

Products:

Technosphere Flows:

	Amount	Unit	Product	Activity	Location
0	0.12867	kilogram	tap water	market for tap water	FR
1	0.1405	kilogram	tap water	tap water production, conventional treatment	FR
2	0.319	kilogram	tap water	tap water production, direct filtration treatment	FR

Biosphere Flows:

	Amount	Unit	Flow Name	Compartment	Database	Formula
0	0.00012867	cubic meter	Water	← water - ground-	biosphere3	

1

Water (water - ground)


Le flux élémentaire d'eau n'est pas spatialisé

2

(b) e391_cutoff biosphere3

Search

	Activity	Categories	Type
4596	Water, turbine use, unspecified natur...	('natural resource', 'in water')	natural resource
4595	Water, salt, sole	('natural resource', 'in water')	natural resource
4594	Water, salt, ocean	('natural resource', 'in water')	natural resource
4593	Water, river	('natural resource', 'in water')	natural resource
4592	Water, lake	('natural resource', 'in water')	natural resource
4591	Water, in air	('natural resource', 'in air')	natural resource
4590	Water, cooling, unspecified natural ...	('natural resource', 'in water')	natural resource
4579	Water	('water', 'fossil well')	emission
4580	Water	('water')	emission
4581	Water	('air', 'non-urban air or from high ...	emission
4582	Water	('air', 'low population density, long-...	emission
4583	Water	('water', 'ocean')	emission



L'ensemble des flux élémentaires n'est pas spatialisé

Figure 79. Processus de marché de l'eau adapté au contexte français, extrait de la base de données ecoinvent 3.9.1, avec détails sur certains flux élémentaires issus de la base de données biosphere3 dans Brightway. Les informations sont visualisées à l'aide de l'Activity Browser.

Il est important de souligner que le modèle d'ACV du shampoing été développé à partir de zéro, comme illustré à la Figure 78a, en raison de l'impossibilité d'importer le fichier CSV généré par SimaPro dans

Brightway 2. La Figure 80 présente le système de produit pour l'utilisation du shampoing, tel qu'il a été modélisé dans Brightway. Cette figure a été générée à l'aide du *Graph Explorer* de l'*Activity Browser*.

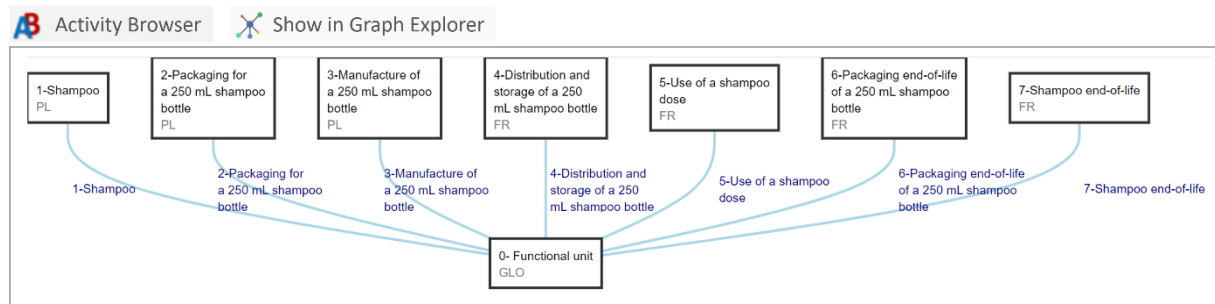


Figure 80. Système de produit comportant les principales étapes du cycle de vie de l'utilisation du shampoing tel que modélisé dans l'*Activity-Browser*

Dans un second temps, le modèle d'ACV de l'utilisation du shampoing, comme décrit précédemment et illustré à la Figure 78a, a été exporté au format Excel depuis l'*Activity Browser*, puis importé dans un projet Brightway intégrant une base de données ecoinvent 3.9.1 avec des flux d'eau spatialisés (voir Figure 78b). Cette intégration a permis de réaliser les analyses identifiées comme 2 et 5 dans la matrice présentée à la Figure 50. L'importation du modèle de base (Figure 78a) dans un nouveau projet permet d'éviter notamment la recréation des paramètres.

Comme le montre la Figure 78b, la deuxième implémentation du modèle ACV pour l'utilisation du shampoing repose sur deux bases de données de flux élémentaires : *biosphere3* et *biosphere_regionalized_water_flows*. La première base de données, installée par défaut dans Brightway, contient uniquement des flux élémentaires non spatialisés. En revanche, la deuxième base de données est dédiée aux flux d'eau spatialisés. Il est important de préciser que cette base de données a été générée à l'aide d'une fonction de la bibliothèque Regionvent (Agez, 2024). En résumé, l'algorithme comprend les étapes suivantes :

1. Création d'une biosphère avec des flux d'eau spatialisés.
2. Association de cette biosphère avec la base de données ecoinvent.
3. Création d'une version régionalisée de la méthode IMPACT World+, personnalisée pour les deux bases de données précédentes : la biosphère et ecoinvent 3.9.1 avec flux d'eau spatialisés.

La spatialisation des flux d'eau nécessite environ trente minutes et est entièrement automatisée, ne nécessitant pas d'intervention manuelle de la part du praticien ACV. De plus, une fois générées, les bases de données et la méthode régionalisée IMPACT World+ 2.0.1 sont disponibles pour d'autres études ACV et ne se limitent pas à l'étude de cas actuelle.

En outre, tel qu'illustré à la Figure 78b, pour cette deuxième implémentation, le modèle ACV du shampoing a été associé à la base de données ecoinvent 3.9.1 avec flux d'eau spatialisés générée par l'algorithme décrit précédemment. Bien que la majorité des liens entre la biosphère et la base de données ecoinvent 3.9.1 se soient faits automatiquement, quelques opérations manuelles ont été nécessaires. En particulier, les flux d'eau pour le processus de marché de l'eau, développés pour le contexte français, ont été spatialisés manuellement. Les flux génériques (non spatialisés) ont été remplacés par les flux correspondants à la France (Figure 81).

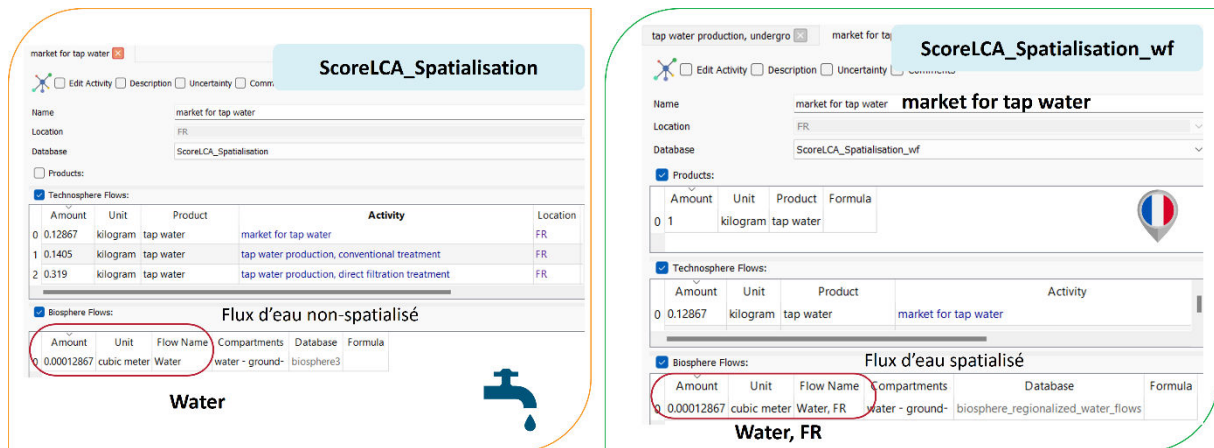


Figure 81. Pour la deuxième implémentation du modèle, les flux d'eau ont été spatialisés en utilisant une version d'ecoinvent 3.9.1 avec des flux d'eau spatialisés. Certains flux d'eau, dont le processus de marché de l'eau potable en France, ont été spatialisés manuellement.

Enfin, le modèle d'ACV pour l'utilisation du shampoing a été intégré dans un projet Brightway utilisant la base de données Regioinvent (Figure 78). Cette base intègre des données commerciales et de consommation, permettant ainsi d'adapter les processus à différents pays ou régions. De plus, elle inclut la spatialisation des flux élémentaires, tels que l'eau et les terres, ainsi que des flux associés aux impacts d'acidification et d'eutrophisation. Cette intégration du modèle correspond à l'analyse 8 de la matrice illustrée à la Figure 50. Afin d'éviter la recréation du modèle depuis le début, le modèle de base a été importé dans ce projet, puis connecté aux bases de données incluant la spatialisation des flux élémentaires et la régionalisation des processus au niveau national (Figure 78c).

Comme le montre la Figure 78c, la troisième implémentation du modèle ACV pour l'utilisation du shampoing est connectée à deux bases de données de flux élémentaires : biosphere3 et biosphere3_regionalized_flows. La première contient les flux élémentaires non spatialisés, tandis que la seconde inclut des flux d'eau, de terres, et d'autres éléments associés aux impacts d'acidification et d'eutrophisation, qui ont été spatialisés. En ce qui concerne les bases de données de la technosphère, le modèle ACV du shampoing est connecté à *e391_cutoff regionalized* et Regioinvent, tous deux issus de la librairie Python Regioinvent (Agez, 2024).

L'utilisation de la librairie Python Regioinvent permet d'effectuer les tâches suivantes, avec un temps de traitement d'environ 2 heures, selon les caractéristiques de performance de l'ordinateur utilisé :

1. Création d'une biosphère avec des flux élémentaires spatialisés.
2. Utilisation de cette biosphère pour générer une version régionalisée de ecoinvent 3.9.1 (nommée *e391_cutoff regionalized* dans la Figure 78c), dont les flux élémentaires sont spatialisés.
3. Création de la base de données Regioinvent intégrant des données commerciales.
4. Création d'une version régionalisée de la méthode IMPACT World+ 2.0.1.

Il convient de noter que Regioinvent contient 185 070 processus (ou activités, selon la terminologie de Brightway), comparativement à la base de données ecoinvent 3.9.1, qui en compte 21 238. De manière similaire, la base de données biosphère passe de 4 718 flux élémentaires à 62 222 flux élémentaires dans la version spatialisée. Cependant, l'extension de la représentativité géographique de l'inventaire ainsi que la spatialisation des flux élémentaires, tels que l'eau, les terres, et ceux liés aux impacts d'acidification et d'eutrophisation, entraîne une augmentation du temps de calcul.

D'autre part, le Tableau 21 montre que la version régionalisée de la méthode IMPACT World+ 2.0.1 inclut des FC régionalisés pour 7 des 18 catégories d'impact au niveau *midpoint* de cette méthode d'ÉICV. L'approche de spatialisation des flux élémentaires pour tenir compte du lieu d'intervention environnementale entraîne une multiplication importante de ces flux. Par exemple, les flux élémentaires

associés à la rareté de l'eau (*Water scarcity*) dans l'implémentation avec Regioinvent sont environ 548 fois plus nombreux que dans la version de base de Brightway, tandis que pour les FC associés à l'eutrophisation d'eau douce, le facteur est de 169.

Tableau 21. Nombre de FC de la méthode IMPACT World+ 2.0.1 (Bulle et al., 2019) dans l'implémentation de base de Brightway (sans spatialisation des flux élémentaires) et après intégration de la base de données Regioinvent (Agez, 2024).

Catégorie d'impact	Nombre de FC (implémentation de base)	Nombre de FC <i>midpoint</i> (implémentation Regioinvent)	Nombre de FC <i>endpoint</i> (implémentation Regioinvent)
Midpoint			
Marine eutrophication	53	12105	9835
Freshwater acidification	41	14383	11663
Terrestrial acidification	41	13188	10693
Freshwater eutrophication	21	3661	3441
Land occupation, biodiversity	60	11019	11019
Land transformation, biodiversity	120	21444	21444
Water scarcity	14	7672	
Endpoint			
Water availability, human health	14		4372

Il est important de préciser que la stratégie d'importation du modèle de base dans un projet Brightway intégrant Regioinvent a consisté d'abord à lier le modèle avec la base de données *e391_cutoff regionalized* (Figure 78c). Cette étape a facilité la correspondance entre les deux versions d'ecoinvent 3.9.1. Ensuite, en utilisant l'*Activity Browser*, les activités ont été adaptées pour mieux correspondre au contexte géographique spécifique, remplaçant celles initialement sélectionnées. Par exemple, comme illustré à la Figure 82, dans la première implémentation du modèle, des processus globaux ou européens ont été employés pour modéliser l'utilisation du chlorure de sodium dans la formulation du shampoing (Figure 82a). Cependant, après l'intégration de la base de données Regioinvent, un processus de marché de consommation spécifique à la Pologne a été choisi, car le shampoing étudié est fabriqué dans ce pays (Figure 82b). Ce choix permet de prendre en compte un processus qui reflète le profil de consommation du chlorure de sodium en Pologne, en intégrant à la fois la production locale et les éventuelles importations.

(a) **ScoreLCA_Spatialisation**

1- Sodium chloride

Name: 1- Sodium chloride
Location: RER
Database: ScoreLCA_Spatialisation

Processus pour représenter l'utilisation de chlorure de sodium

Technosphere Flows:

Amount	Unit	Product	Activity	Location	Database	Formula
0	0	kilogram	sodium chloride, powder	market for sodium chloride, powder	GLO	e391_cutoff 1*(1-ICV_regio)
1	0.0347	ton kilometer	transport, freight, inland waterways, barge	market for transport, freight, inland waterways, barge	RER	e391_cutoff 0.0347*ICV_regio
2	0.1724	ton kilometer	transport, freight, lorry, unspecified	market for transport, freight, lorry, unspecified	RER	e391_cutoff 0.1724*ICV_regio
3	0.1561	ton kilometer	transport, freight train	market group for transport, freight train	RER	e391_cutoff 0.1561*ICV_regio
4	0.0053	ton kilometer	transport, freight, light commercial vehicle	market group for transport, freight, light commercial vehicle	RER	e391_cutoff 0.0053*ICV_regio
5	1	kilogram	sodium chloride, powder	sodium chloride production, powder	RER	e391_cutoff ICV_regio

(b) **ScoreLCA_Spatialisation_regio**

1- Sodium chloride

Name: 1- Sodium chloride
Location: PL
Database: ScoreLCA_Spatialisation_regio

Processus pour représenter l'utilisation de chlorure de sodium

Products:

Amount	Unit	Product	Formula
0	1	kilogram	1- Sodium chloride

Technosphere Flows:

Amount	Unit	Product	Activity	Location	Database	Formula
0	1	kilogram	sodium chloride, powder	consumption market for sodium chloride, powder	PL	Regioinvent ICV_regio

Figure 82. L'utilisation du chlorure de sodium dans la formulation a d'abord été modélisée en utilisant des processus de marché global (ICV_regio = 0) ou des processus européens (ICV_regio = 1). Par la suite, ces processus ont été remplacés par un processus de marché de consommation spécifique au chlorure de sodium.

5.7.2 Analyse des résultats globaux de l'ACV

Dans un premier temps, conformément au logigramme de Patouillard et al. (2015), une modélisation initiale a été réalisée afin d'identifier les zones nécessitant des efforts supplémentaires pour améliorer la représentativité géographique de l'étude. Il a été considéré que l'incertitude spatiale associée aux résultats pourrait être élevée, justifiant ainsi la nécessité de suivre les étapes suivantes du logigramme (Figure 83). Bien que la section 5.7.1 semble linéaire, elle est en réalité itérative, et les résultats obtenus avec la méthode IMPACT World+ 2.0.1 au niveau des dommages visent à justifier les analyses ultérieures.

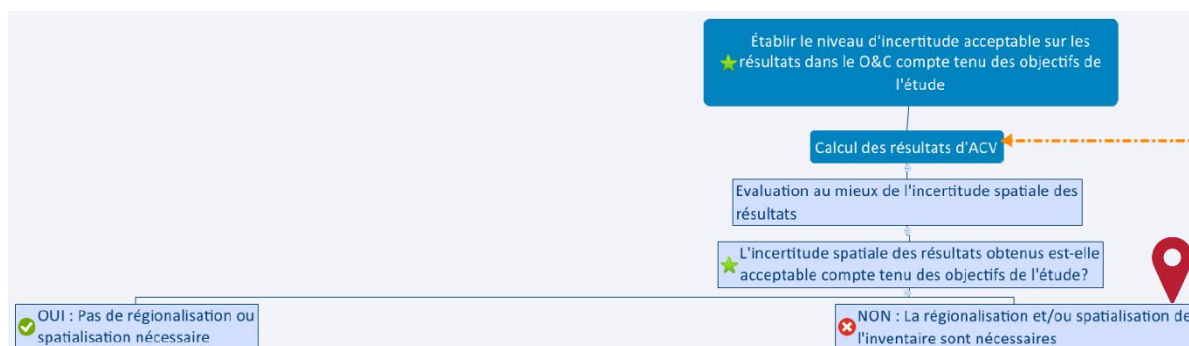


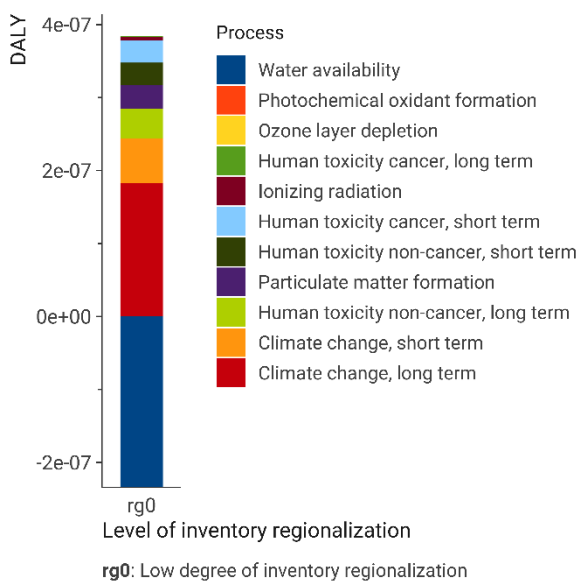
Figure 83. Phase préliminaire du logigramme réaliste pour la mise en œuvre de la régionalisation et la spatialisation de l'inventaire en ACV. Tiré de Patouillard et al. (2015).

Pour l'analyse préliminaire, correspondant à l'élément 1 de la matrice présentée à la Figure 50, les processus de production des ingrédients du shampoing sont considérés comme génériques, avec une localisation globale (GLO), et le marché de l'eau potable est approximé par celui ayant une géographie *Europe without Switzerland*.

La Figure 84a illustre que, pour les impacts au niveau dommage sur la santé humaine, la catégorie *Water availability*, régionalisée dans la méthode IMPACT World+, contribue d'environ -61 % aux impacts totaux. Pour cette catégorie d'impact, le processus *market for wastewater, average, Europe without Switzerland* est prédominant (Figure 85). Par conséquent, un processus de marché de l'eau a été généré pour le contexte français.

De plus, la Figure 84b révèle que les catégories d'impact *Land transformation, biodiversity* et *Land occupation, biodiversity* contribuent ensemble à environ 20 % des impacts totaux sur la qualité des écosystèmes. L'analyse de contribution par processus pour ces catégories montre que les ingrédients du shampoing, tels que la glycérine, le sodium laureth sulfate, la cocamidopropyl bétaïne, l'acide citrique et l'acide salicylique, sont des contributeurs importants à ces impacts (Figure 86). En conséquence, comme décrit précédemment, le paramètre *ICV_regio* a été défini pour permettre le remplacement des processus globaux par ceux adaptés au contexte européen, étant donné que la fabrication du shampoing a lieu en Pologne (voir ligne 2 de la Figure 50).

(a) IMPACT World+ Endpoint 2.0.1
Human health



(b) IMPACT World+ Endpoint 2.0.1
Ecosystem quality

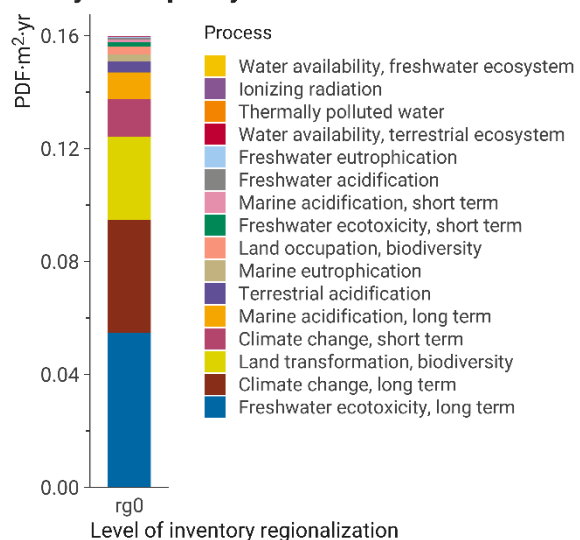


Figure 84. Analyse de contribution des impacts liés aux aires de protection, classées par catégories d'impacts endpoint : (a) Human health et (b) Ecosystems quality, selon la méthode IMPACT World+ pour l'implémentation de base dans Brightway avec ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires.

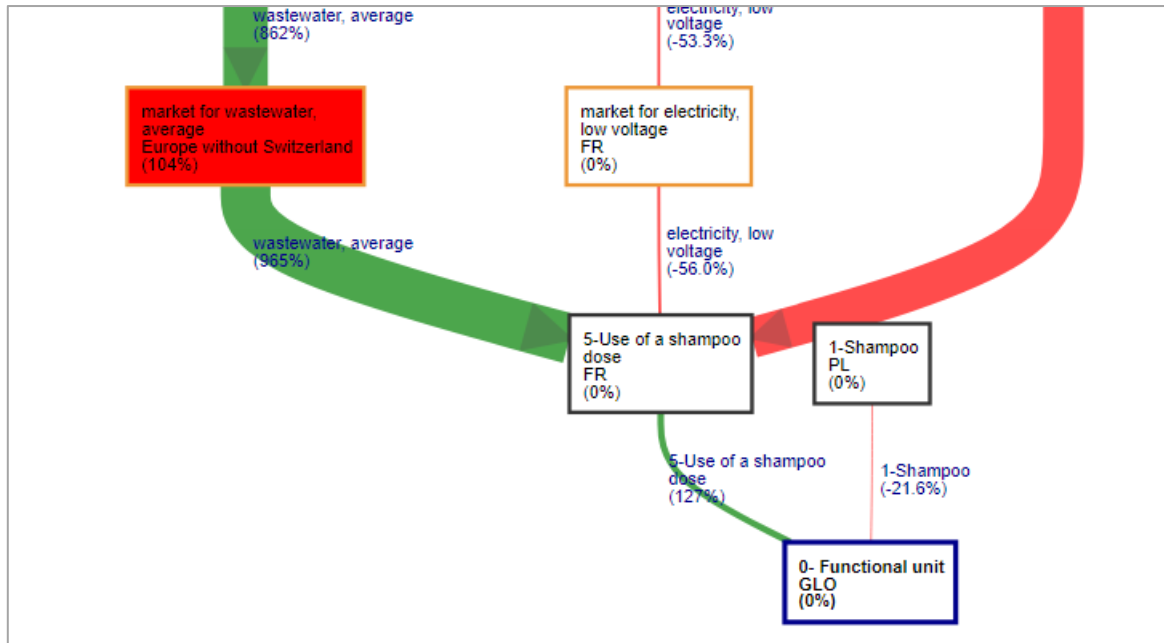


Figure 85. Analyse de contribution des processus aux impacts sur la santé humaine pour la catégorie Water scarcity selon la méthode IMPACT World+ et basée sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisations des flux élémentaires.

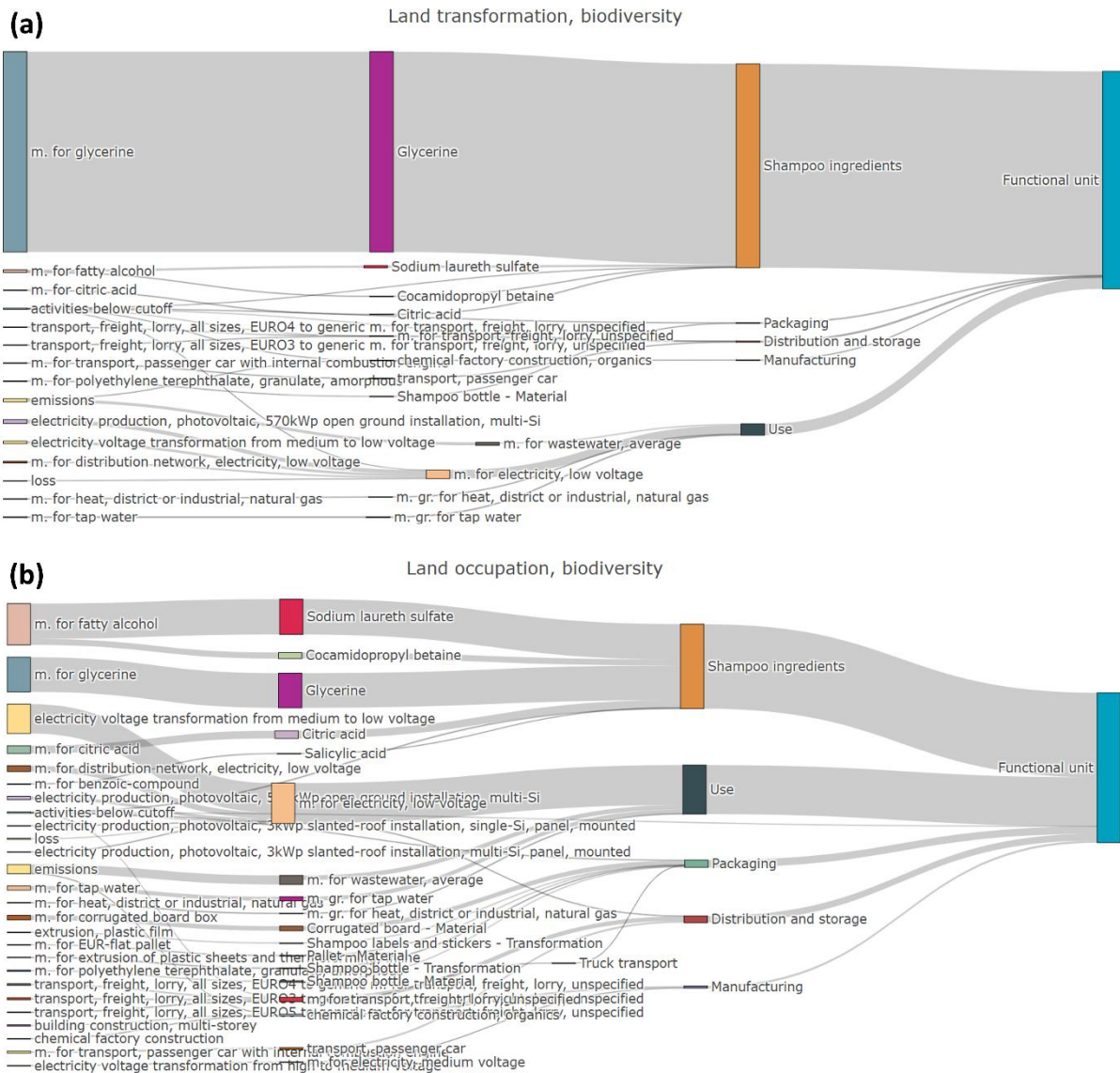


Figure 86. Diagrammes de Sankey illustrant la contribution des processus aux catégories d'impact : (a) Land transformation, biodiversity et (b) Land occupation, biodiversity. L'analyse est réalisée selon la méthode IMPACT World+ et repose sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires

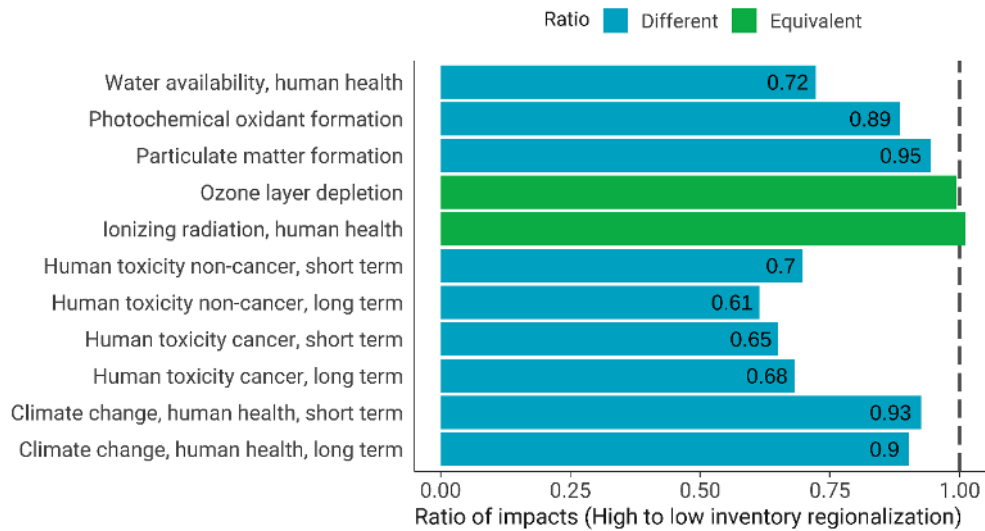
5.7.3 Analyse des résultats avec ICV régionalisé

Les ingrédients utilisés dans la formulation du shampoing ont d'abord été modélisés selon des processus de marché globaux (*GLO*) ainsi que ceux du reste du monde (*RoW*), dans le cas où l'origine des matières premières n'était pas spécifiée. Toutefois, étant donné que la fabrication du shampoing se déroule en Pologne, l'ICV a été régionalisé en appliquant des processus de marché plus adaptés à l'Europe, remplaçant ainsi les processus globaux.

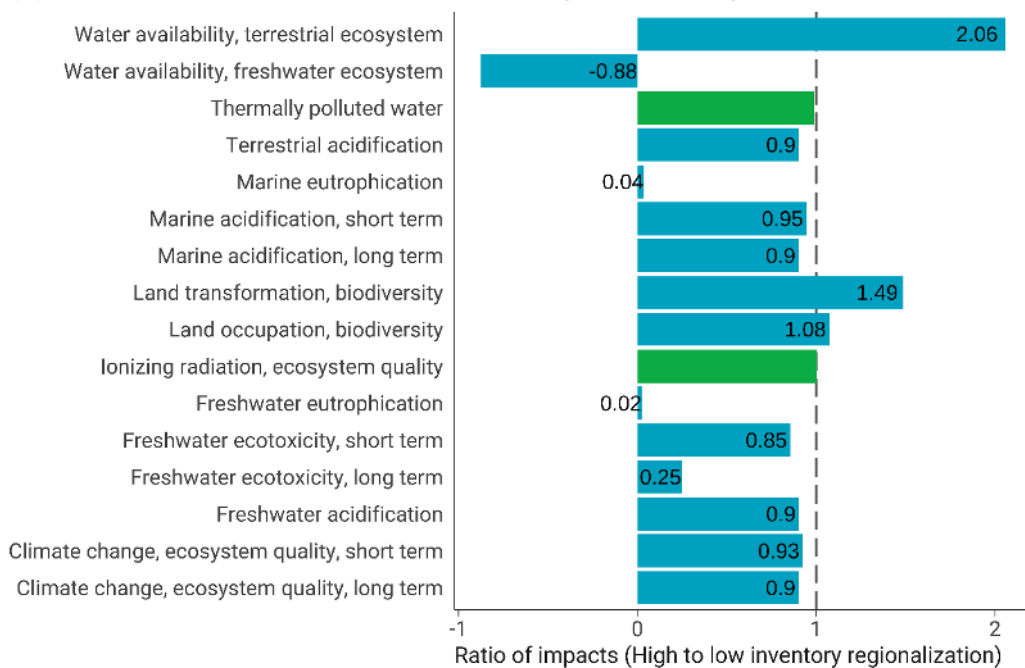
La Figure 87 montre que les impacts sur *Human health*, calculés avec la méthode d'ÉICV IMPACT World+, étaient surestimés en utilisant des processus génériques *GLO*. En revanche, les impacts sur *Ecosystem quality*, tels que la catégorie *Water availability (terrestrial ecosystem)*, sont deux fois plus élevés avec une régionalisation plus précise de l'ICV comparativement à l'utilisation des processus *GLO*. De même, les impacts liés à la transformation des terres sont 1,49 fois supérieurs à ceux du scénario de base.

Impact results ratio: high vs. low inventory regionalization

(a) IMPACT World+ Endpoint 2.0.1 - Human health



(b) IMPACT World+ Endpoint 2.0.1 - Ecosystem quality



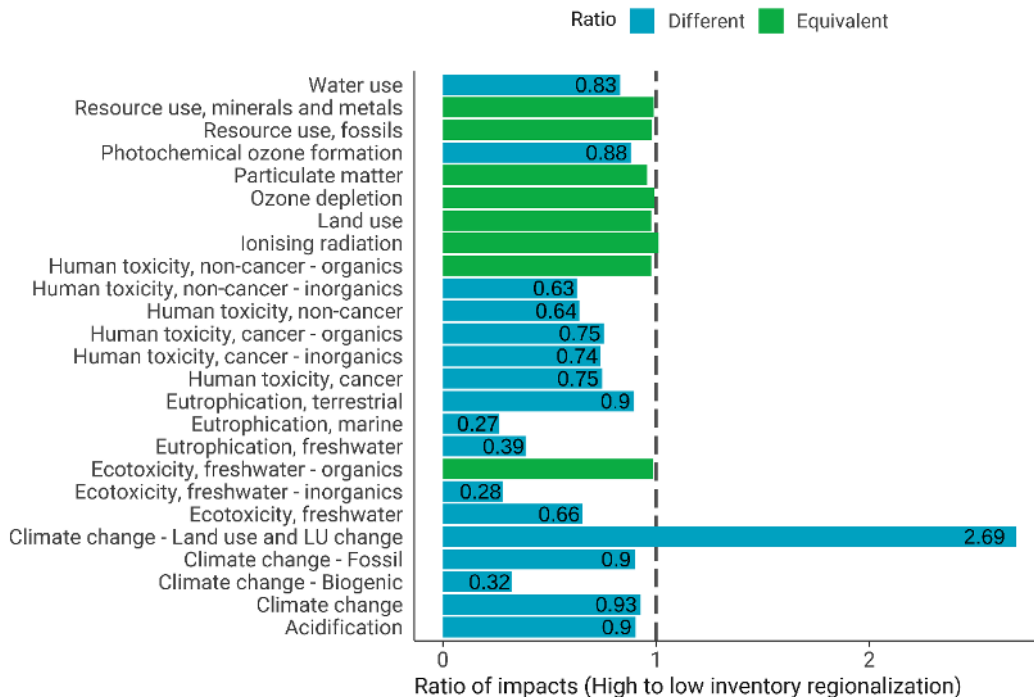
A difference of up to 5% was deemed acceptable to consider the results as equivalent.

Figure 87. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé à un niveau de régionalisation faible de l'ICV. Le calcul est réalisé avec la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Endpoint et repose sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires.

Après avoir calculé les résultats avec IMPACT World+, les résultats de l'ÉICV ont aussi été recalculés en utilisant la méthode EF 3.1. La Figure 88 montre que, pour la plupart des catégories d'impact, les impacts de l'utilisation du shampoing en France seraient surestimés si des processus génériques sont employés, à l'exception de la catégorie *Climate change- Land use and LU change*, où les impacts sont 2,69 fois plus élevés que ceux du scénario de base.

Ces résultats soulignent l'importance de choisir des processus de modélisation représentatifs pour les systèmes étudiés. En effet, les différences dans les niveaux de régionalisation peuvent entraîner des variations significatives dans les résultats d'impact, pouvant mener à des conclusions erronées.

Impact results ratio: high vs. low inventory regionalization EF 3.1



A difference of up to 5% was deemed acceptable to consider the results as equivalent.

Figure 88. Ratio des impacts environnementaux de l'utilisation du shampoing en France, comparant un niveau de régionalisation élevé à un niveau de régionalisation faible de l'ICV. Le calcul est réalisé avec la méthode EF 3.1 et repose sur l'implémentation de Brightway avec la base de données ecoinvent 3.9.1, sans spatialisation des flux élémentaires

5.7.4 Analyse des résultats avec ÉICV régionalisée

Cette section présente les résultats d'ÉICV en utilisant différents niveaux d'ICV régionalisés et de spatialisation de flux élémentaires. Initialement, les résultats obtenus avec le modèle ACV intégré dans un projet Brightway, comportant des flux élémentaires spatialisés, seront examinés. Cette analyse permet d'évaluer l'effet de la spatialisation des flux d'eau sur les résultats (Figure 78a). Par la suite, les résultats issus de la base de données Regioinvent seront exposés afin de démontrer l'effet combiné d'un niveau de régionalisation plus détaillé de l'ICV et de l'utilisation d'une méthode régionalisée d'ÉICV (Figure 78b).

Il convient de noter que l'approche de calculs des impacts spatialisés appliquée est la spatialisation des flux, où chaque flux reçoit un identifiant de localisation spécifique, associé au FC correspondant lors du calcul de l'ÉICV (section 3.5.2). Cette approche implique que l'utilisation d'une méthode d'ÉICV non régionalisée, telle qu'EF 3.1 (voir Figure 52), entraînerait des résultats incorrects en raison d'une correspondance incomplète entre les flux élémentaires et les FC. Par conséquent, les analyses présentées dans cette section sont basées exclusivement sur la version régionalisée de la méthode d'ÉICV IMPACT World+ 2.0.1, développée lors de la création de la base de données Regioinvent.

La librairie Regioinvent génère une version régionalisée de la méthode IMPACT World+, associant des FC spécifiques aux régions définies dans la base de données ecoinvent 3.9.1. Cette régionalisation concerne les catégories d'impact liées aux flux d'eau, à l'utilisation des terres, ainsi qu'à l'acidification

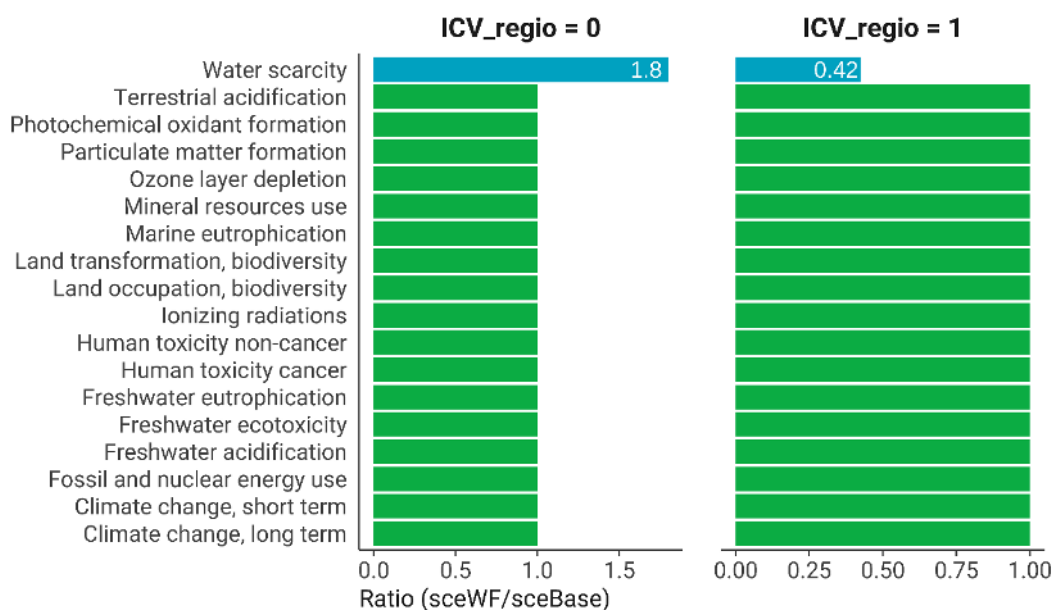
et à l'eutrophisation. Elle est indispensable pour caractériser correctement les flux élémentaires spatialisés. En effet, sans cette adaptation, les résultats seraient inexacts, car les méthodes d'ÉICV dans l'implémentation standard de Brightway ne sont pas régionalisées.

5.7.4.1 Spatialisation des flux d'eau

Dans Brightway, les résultats de l'étude de cas en appliquant la méthode d'ÉICV IMPACT World+ 2.0.1 Midpoint sans régionalisation et utilisant l'implémentation par défaut des bases de données d'ICV (sans spatialisation des flux élémentaires), montrent des résultats incorrects pour la catégorie d'impact liée à la rareté de l'eau.

En effet, dans l'approche avec faible niveau de régionalisation (avec `ICV_regio` réglé à 0), les résultats d'impact *Water scarcity* pour le modèle dont les flux d'eau sont spatialisés sont 1,8 fois plus élevés que ceux obtenus avec le modèle sans spatialisation des flux d'eau (voir Figure 89). En revanche, lorsqu'un modèle avec une meilleure régionalisation de l'inventaire est utilisé (avec `ICV_regio` réglé à 1), les résultats d'impact *Water scarcity* pour le modèle avec flux d'eau spatialisés sont réduits à 0,42 fois ceux du modèle sans spatialisation des flux d'eau (voir Figure 89). Les autres catégories d'impact présentées dans la voir Figure 89 ne montrent pas de variation, puisque les flux élémentaires associés à ces catégories ne sont ni spatialisés ni régionalisés.

Comparison of LCIA Results for sceWf and sceBase IMPACT World+ Midpoint 2.0.1



ICV_regio = 0 : Low degree of inventory regionalization
ICV_regio = 1 : Higher degree of inventory regionalization

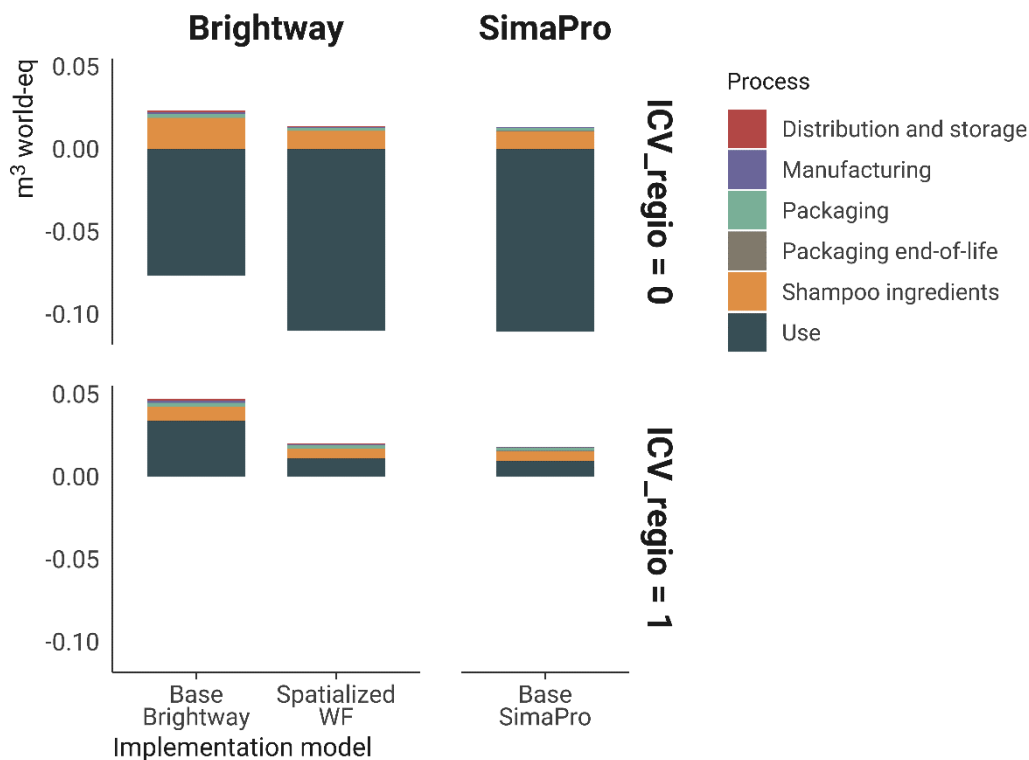
Please note that the x-axis is not scaled consistently across both panels in this figure.

Figure 89. Ratio des impacts environnementaux liés à l'utilisation du shampoing en France, comparant les résultats obtenus avec un inventaire avec des flux d'eau spatialisés (sceWF) à ceux obtenus avec un inventaire sans spatialisation des flux d'eau (sceBase). Le calcul est réalisé avec la méthode IMPACT World+ 2.01 Midpoint.

Pour contextualiser les résultats obtenus avec Brightway, pour la catégorie d'impact *Water scarcity* en utilisant la méthode ÉICV IMPACT World+ 2.0.1, la Figure 90 compare ces résultats avec ceux issus de SimaPro. Le modèle « Base Brightway » représente l'implémentation par défaut des bases de données d'ICV sans spatialisation des flux élémentaires et méthodes non régionalisées. En revanche, « Base SimaPro » correspond au modèle par défaut de SimaPro, qui inclut déjà des flux élémentaires

spatialisés ainsi que la version régionalisée de la méthode ÉICV IMPACT World+. La Figure 90 illustre que, à quelques variations près, les résultats obtenus pour le modèle *Spatialized WF* avec Brightway sont comparables à ceux obtenus avec SimaPro. Ces observations soulignent la nécessité de spatialiser les flux d'eau, car l'utilisation de l'implémentation par défaut de ecoinvent dans Brightway peut conduire à des résultats incorrects.

Impact Results Comparison for Water Scarcity IMPACT World+ Midpoint 2.0.1



ICV_regio = 0 : Low degree of inventory regionalization
 ICV_regio = 1 : Higher degree of inventory regionalization
 WF represents water flows

Figure 90. Impacts liés à la catégorie Water scarcity (rareté de l'eau) associés à l'utilisation du shampoing en France. Cette figure compare les résultats obtenus avec un inventaire sans spatialisation des flux d'eau à ceux obtenus avec un inventaire intégrant la spatialisation des flux d'eau. Les calculs sont réalisés avec la méthode IMPACT World+ 2.01 Midpoint, en utilisant les logiciels Brightway et SimaPro, pour deux niveaux de régionalisation de l'ICV (en utilisant le paramètre ICV_regio).

5.7.4.2 Utilisation de Regioinvent

Cette section vise à évaluer l'impact de l'utilisation de Regioinvent, une base de données intégrant des processus plus spécifiques à l'échelle des pays, en comparant les résultats obtenus avec ce modèle (élément 8 de la Figure 50) à ceux du modèle *Spatialized WF*, qui utilise une base de données ecoinvent avec des flux d'eau spatialisés. Il convient de noter que l'intégration dans Regioinvent a été réalisée en utilisant une seule valeur pour le paramètre *ICV_regio*, fixé à 1, dans le but de sélectionner des processus plus représentatifs du contexte spatial du cycle de vie du shampoing.

La Figure 78 a précédemment illustré les connexions des différentes intégrations du modèle d'ACV pour l'utilisation du shampoing. Le modèle *Spatialized WF* est connecté à une version de la base de données ecoinvent 3.9.1 avec des flux d'eau spatialisés. De plus, la Figure 91 montre les connexions du modèle *Spatialized WF* avec sa propre base de données, en raison de la recontextualisation des processus de

marché pour l'eau potable en France. En revanche, l'intégration du modèle Regioinvent établit des connexions avec la base de données du même nom, notamment pour les ingrédients du shampoing (62% des processus utilisés) et pour les emballages (55% des processus utilisés). L'utilisation des processus de Regioinvent, en particulier ceux de type *consumption market*, a permis de réduire le nombre de processus à intégrer dans la modélisation de l'avant-plan, offrant ainsi un gain de temps significatif lors de la réalisation d'une ACV.

Des différences notables apparaissent dans le nombre de connexions établies avec les bases de données d'ICV, notamment pour les ingrédients du shampoing. Dans l'intégration *Spatialized WF*, des processus de production sont combinés avec des processus de transport pour modéliser la chaîne d'approvisionnement des ingrédients vers la Pologne. En revanche, l'intégration Regioinvent utilise des processus de type *consumption market for product, PL* pour modéliser les ingrédients du shampoing et certains matériaux d'emballage. Étant donné que les processus *consumption market* incluent déjà des processus de transport, les connexions directes avec les bases de données sont réduites pour les ingrédients du shampoing dans l'intégration Regioinvent, par rapport à l'intégration *Spatialized WF*.

Number of connections to LCI databases

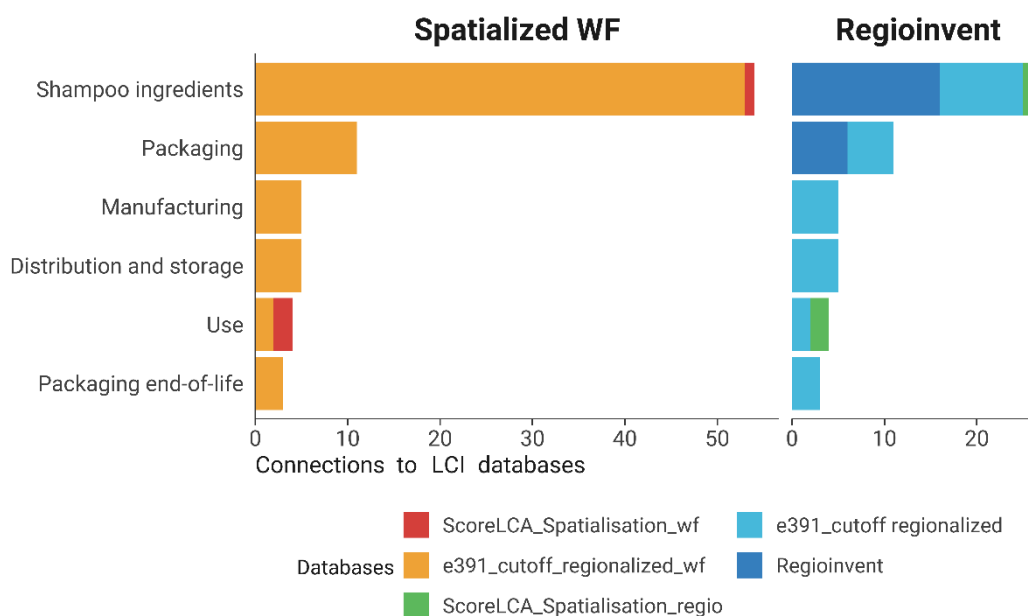


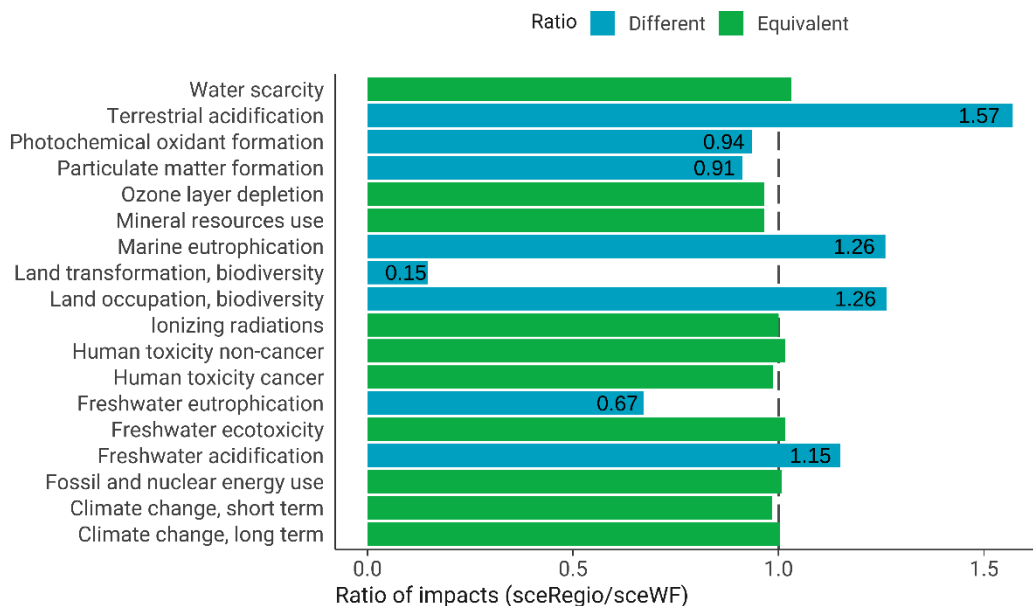
Figure 91. Nombre de connexions aux bases de données ICV pour chaque étape du cycle de vie du shampoing utilisé en France, comparé entre les deux implémentations du modèle : *Spatialized WF* et *Regioinvent*.

Les résultats obtenus en utilisant la méthode IMPACT World+ 2.0.1 au niveau des impacts problèmes révèlent que les impacts environnementaux varient en fonction du degré de régionalisation de l'inventaire et de la spatialisation des flux élémentaires (Figure 92). Le modèle ACV connecté à la base de données Regioinvent, incluant la spatialisation des flux élémentaires d'eau, des terres, ainsi que des flux liés à l'acidification et à l'eutrophisation, montre des différences significatives par rapport au modèle *Spatialized WF* connecté à ecoinvent 3.9.1. Les principales variations sont observées dans les catégories telles que l'acidification terrestre et aquatique, l'eutrophisation marine et d'eau douce, l'utilisation et la transformation des terres (Figure 92).

Par exemple, la Figure 92 montre que les impacts associés à l'acidification terrestre peuvent atteindre jusqu'à 1.57 fois les valeurs obtenues avec le modèle *Spatialized WF* lorsqu'on utilise les processus de Regioinvent. En revanche, les impacts d'eutrophisation aquatique pour le modèle Regioinvent sont réduits à 0.67 fois ceux obtenus avec le modèle *Spatialized WF* (Figure 92).

La Figure 92 illustre que la différence dans les résultats pour les catégories de rareté d'eau entre les deux modèles est inférieure à 5 %. Ce résultat est spécifique à cette étude de cas et peut être attribué au fait que les deux implémentations du modèle d'ACV incluent déjà des flux d'eau spatialisés. Il est également à noter que, malgré l'utilisation de bases de données d'inventaire avec différents niveaux de spécificité géographique, les différences observées dans les catégories d'impacts telles que le changement climatique, l'écotoxicité aquatique et la toxicité humaine sont inférieures à 5 %.

Impact results ratio: Regioinvent vs. Spatialized WF model IMPACT World+ Midpoint 2.0.1



A difference of up to 5% was deemed acceptable to consider the results as equivalent.
WF represents water flows

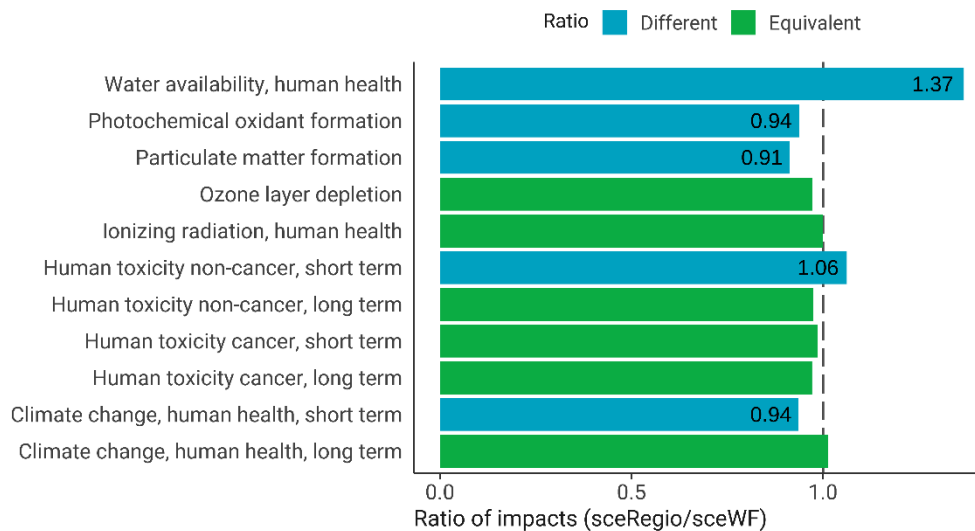
Figure 92. Ratio des impacts environnementaux associés à l'utilisation du shampoing en France. Comparaison des résultats obtenus avec le modèle connecté à RegioInvent et ceux obtenus avec un modèle intégrant la spatialisation des flux d'eau. Les calculs sont effectués selon la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Midpoint.

La Figure 93 révèle également que les impacts sur la catégorie d'impact *Water availability* et *human toxicity non-cancer short-term* (non-cancer, court terme) au niveau dommage pour le modèle Regioinvent sont respectivement 1.37 et 1.07 fois ceux observés avec le modèle *Spatialized WF*. Les principales variations se manifestent dans les scores relatifs à la qualité des écosystèmes, en particulier pour les catégories *freshwater acidification* et *terrestrial acidification*, où les scores pour le modèle Regioinvent sont 1.83 fois ceux du modèle *Spatialized WF*.

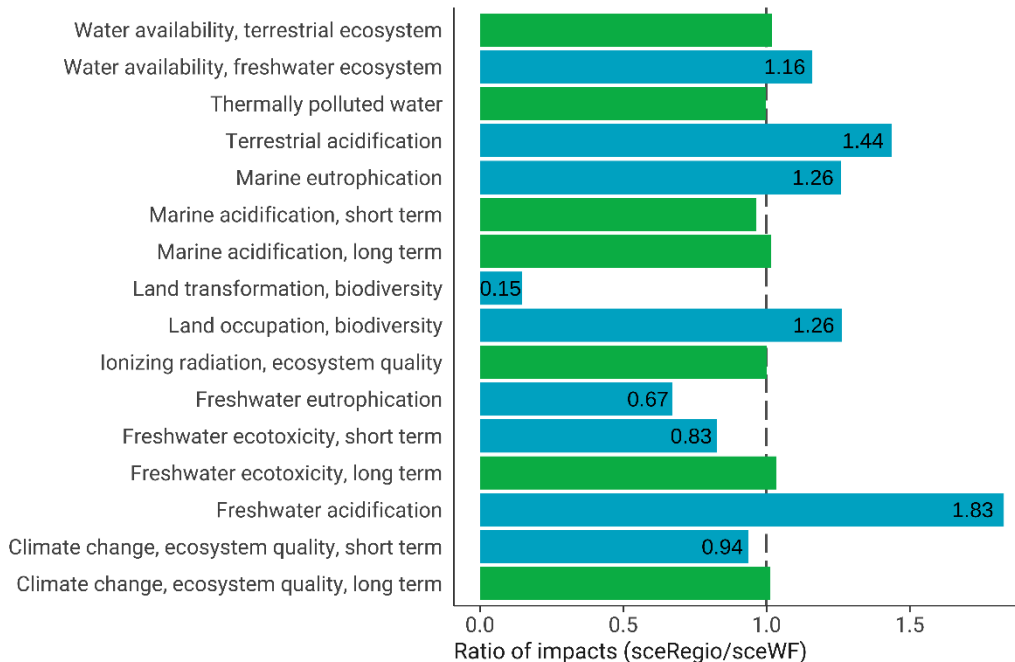
Ces résultats mettent en évidence l'impact de l'utilisation de processus plus spécifiques au système analysé. En effet, la base de données Regioinvent offre une meilleure modélisation des ingrédients et des emballages en tenant compte de données sur les flux commerciaux plus détaillées pour modéliser ces processus de marché. Toutefois, il convient de considérer que les différences observées résultent à la fois de la spatialisation supplémentaire des flux élémentaires (eau, terres, acidification, eutrophisation) et d'une description améliorée des processus de marché.

Impact results ratio: Regioinvent vs. Spatialized WF model

(a) IMPACT World+ Endpoint 2.0.1 - Human health



(b) IMPACT World+ Endpoint 2.0.1 - Ecosystem quality



A difference of up to 5% was deemed acceptable to consider the results as equivalent. WF represents water flows

Figure 93. Ratio des impacts environnementaux associés à l'utilisation du shampoing en France. Comparaison des résultats obtenus avec le modèle connecté à RegioInvent et ceux obtenus avec un modèle intégrant la spatialisation des flux d'eau. Les calculs sont effectués selon la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Endpoint.

5.7.4.3 Approches pour visualiser les résultats d'impacts spatialisés

Cette section vise à présenter des visualisations complémentaires conçues pour faciliter l'interprétation et la communication des résultats, en tenant compte des aspects spatiaux. Il convient de préciser que ces visualisations se concentrent uniquement sur la représentation de l'origine des impacts et ne traitent pas de la destination des impacts.

De plus, cette section a pour sous-objectif de mettre en évidence les possibilités offertes par le logiciel Brightway en matière d'interaction avec le modèle d'ACV et les résultats qui peuvent en être dérivés. Néanmoins, il est important de noter que cette interaction entraîne des tâches supplémentaires pour le traitement et la représentation des résultats. Les versions interactives de ces visualisations sont accessibles sur le site suivant : <https://ciraig.github.io/scorelca-spatialisation>.

La première visualisation, de type diagramme de Sankey, permet de représenter la contribution des processus en amont et en arrière-plan, selon le niveau de détail souhaité. Par exemple, la Figure 94 illustre la contribution des processus aux impacts liés à l'occupation des terres pour l'utilisation de shampoing en France. Les données présentées dans cette figure ont été calculées à l'aide d'une fonction modifiée de la librairie Python Polyviz (Sacchi, 2023), et la figure elle-même a été générée avec la librairie Plotly (Sievert, 2020). Il convient de noter que cette représentation est limitée lorsqu'il y a à la fois des résultats positifs et négatifs, car elle est adaptée aux situations où toutes les valeurs ont le même signe algébrique. Dans une optique de prise en compte des aspects géographiques en ACV, ce type de représentation permet d'identifier facilement les principaux contributeurs sur lesquels agir pour améliorer la précision des résultats.

La deuxième visualisation présente l'origine des impacts pour une catégorie d'impact spécifique. Par exemple, la Figure 95 montre l'origine des impacts liés à l'occupation des terres pour l'utilisation de shampoing en France. Ces résultats sont obtenus grâce à une fonction de la librairie Polyviz (Sacchi, 2023) et représentés avec la librairie JavaScript Leaflet. Il est important de préciser que la fonction de Polyviz utilisée distribue les impacts d'une région aux pays de cette région en fonction du produit intérieur brut. Cette hypothèse de travail permet de visualiser la distribution spatiale des impacts d'origine, mais elle doit être prise en compte lors de l'interprétation des résultats.

Enfin, la troisième visualisation est un *treemap*, qui fournit une représentation hiérarchique des impacts. Le premier niveau représente la région ou le pays d'origine de l'impact, le deuxième niveau montre les secteurs d'activités selon la classification de la base de données ecoinvent 3.9.1, et le troisième niveau affiche les activités génératrices d'impacts. Par exemple, la Figure 96 présente un *treemap* des impacts liés à l'occupation des terres pour l'utilisation de shampoing en France. Ces résultats ont été générés à l'aide d'une fonction modifiée de la librairie Polyviz (Sacchi, 2023), intégrant notamment le secteur des activités de ecoinvent 3.9.1. Il est également important de préciser que lorsque la contribution d'un processus est inférieure à 1 % du total des impacts, sa localisation est regroupée sous la catégorie *Other*.

Ces visualisations peuvent être utilisées de manière complémentaire, car elles offrent différents niveaux de détail. Ainsi, il est possible de commencer l'analyse avec le diagramme de Sankey, qui fournit une vue par étape du cycle de vie. Ensuite, la carte permet d'identifier la distribution spatiale de l'origine des impacts, et le *treemap* aide à identifier les principales activités contribuant aux impacts par secteur et par pays.

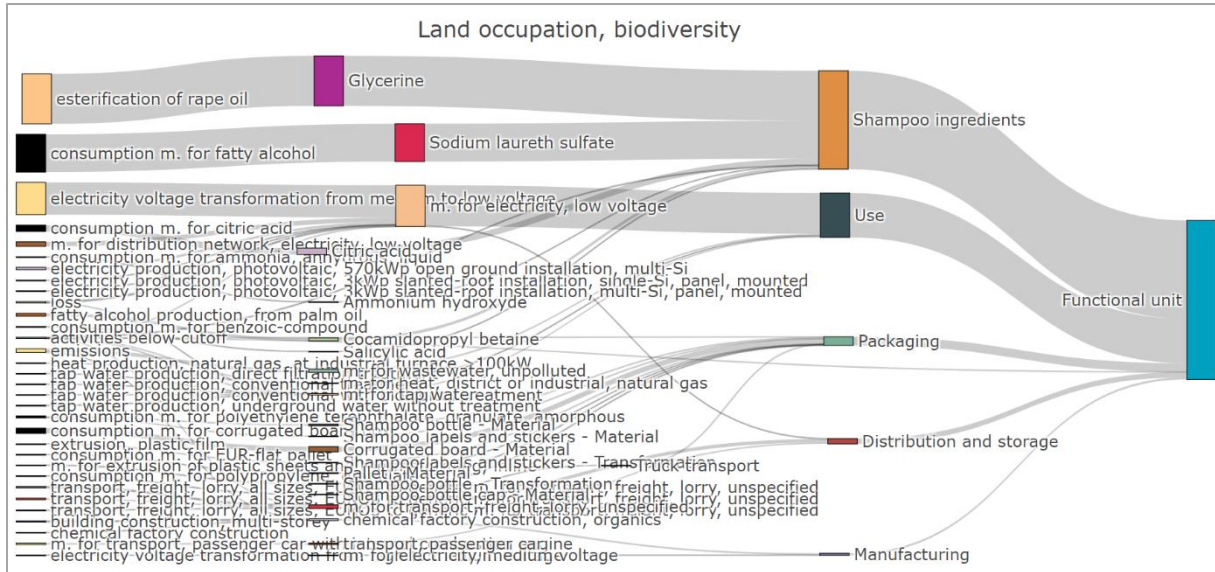


Figure 94. Diagramme de Sankey montrant les contributions des processus à la catégorie d'impact Land occupation, biodiversité selon la méthode d'ÉICV IMPACT World+ et l'implémentation du modèle ACV avec Regioinvent.

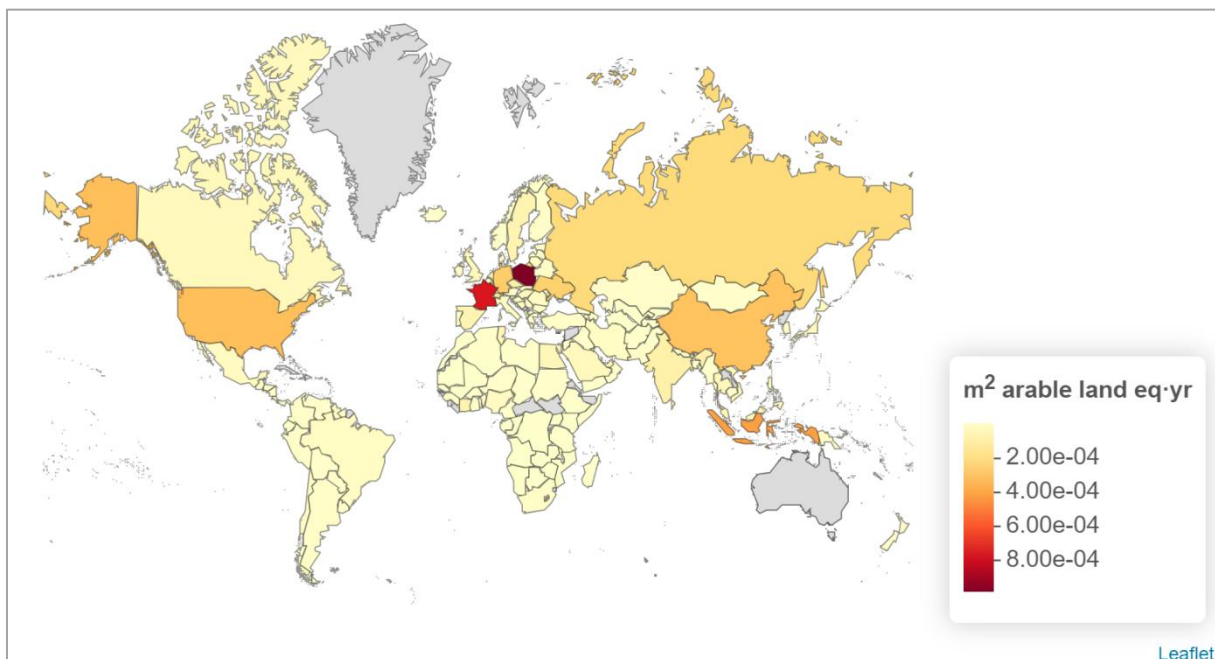


Figure 95. Répartition géographique de l'origine des impacts associés à la catégorie d'impact land occupation, basée sur la méthode EICV IMPACT World+ et le modèle ACV connecté avec Regioinvent.

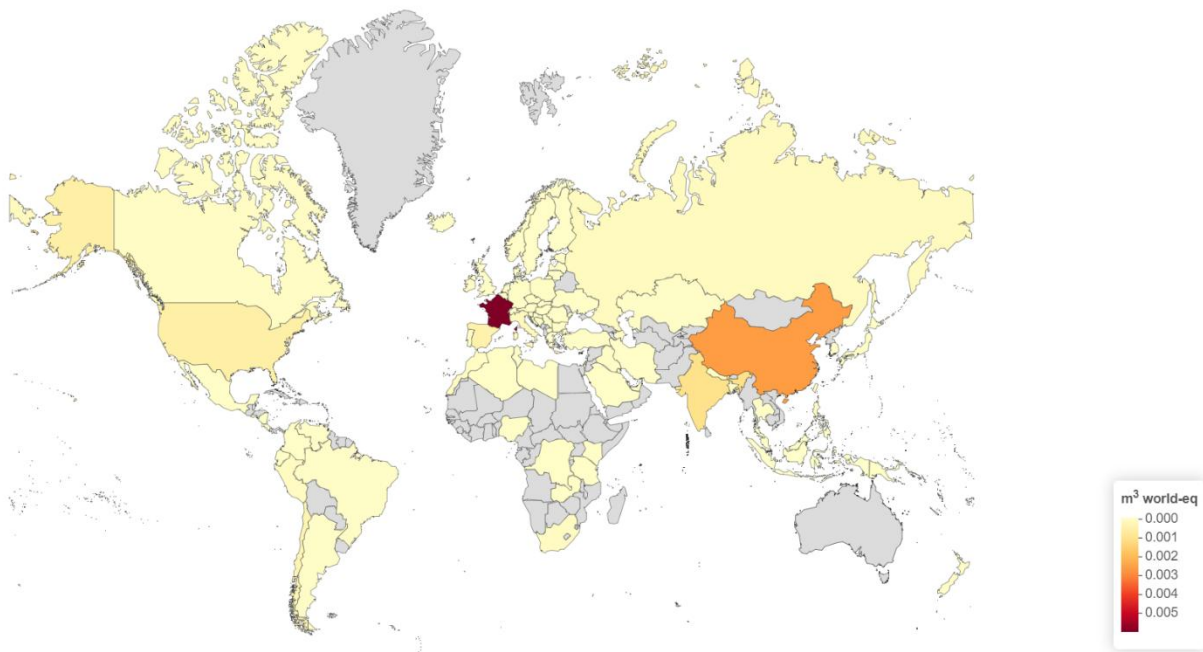


Figure 97. Répartition géographique de l'origine des impacts associés à la catégorie *Water scarcity*, basée sur la méthode IMPACT World+ et le modèle d'ACV pour l'utilisation de shampooing, connecté à Regioinvent.

Les FC régionalisés natifs pour l'évaluation de la catégorie *water scarcity* ont été obtenus à partir du site d'IMPACT World+. Les opérations SIG nécessaires ont été réalisées en utilisant la bibliothèque GeoPandas (voir 3.5.2.2), en dehors de Brightway. La carte mondiale des FC a d'abord été découpée pour correspondre à l'étendue de la France métropolitaine. Ensuite, les FC régionalisés natifs (à l'échelle des bassins versants) ont été agrégés au niveau des départements français, avec une pondération par surface lorsque plusieurs bassins versants étaient inclus dans un même département (Figure 98). Il est important de noter que cette approche est simplificatrice, car les développeurs de la méthode IMPACT World+ recommandent une pondération basée sur la consommation d'eau (Bulle et al., 2019).

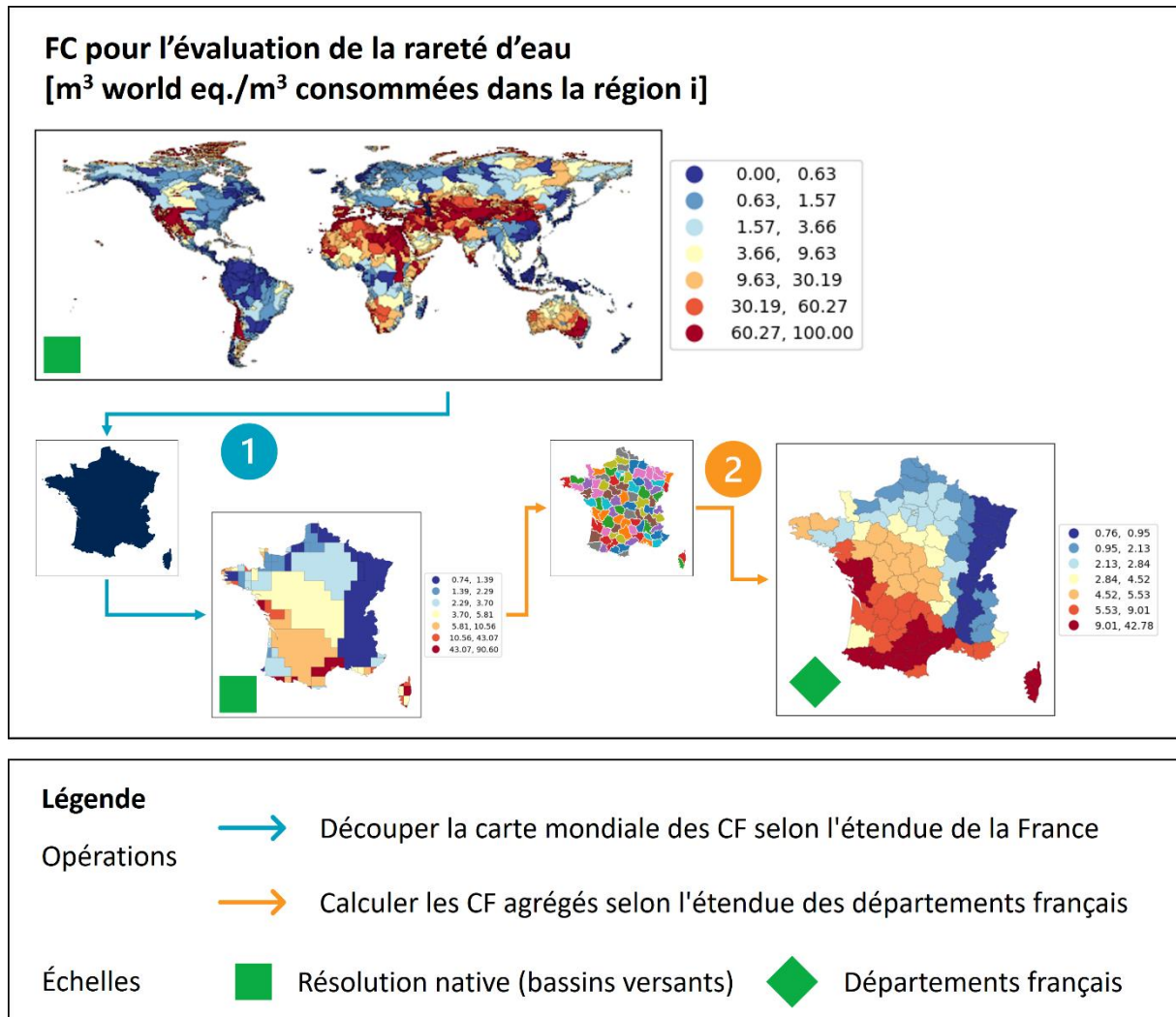


Figure 98. Calcul des FC agrégés par département en France pour évaluer la catégorie *water scarcity* (rareté de l'eau), utilisant la méthode AWARE intégrée dans la méthode IMPACT World+ 2.0.1 Midpoint.

Cette première étape révèle que le FC pour la catégorie *water scarcity*, associé à l'utilisation d'un mètre cube d'eau en France (8.15 m³/m³), présente une variabilité spatiale significative, estimée à environ 1.95 ordres de magnitude entre les valeurs minimale et maximale des FC régionalisés natifs. En comparaison, la variabilité spatiale des FC agrégés au niveau des départements français est réduite à environ 1.6 ordres de magnitude (Figure 99).

CF pour l'évaluation de la rareté d'eau [m³ world eq./m³ consommées dans la région i]

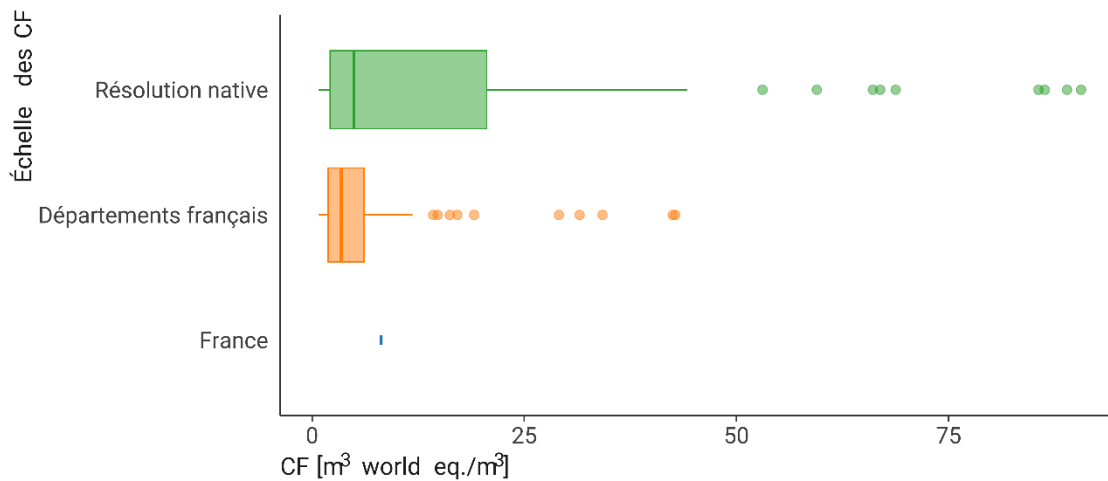


Figure 99. FC pour l'évaluation de la catégorie water scarcity (rareté de l'eau) [m³ équivalent mondial/m³ consommé dans la région i]. Distribution des FC régionalisés natifs pour la France et des FC agrégés par département, et comparaison avec la valeur unique utilisée pour l'ensemble du pays.

La deuxième étape a consisté à extraire l'inventaire des flux d'eau localisés en France, cette opération ayant été réalisée avec Brightway. Enfin, lors de la troisième étape, l'inventaire des flux d'eau pour la France a été caractérisé avec les FC calculés pour chaque département français, permettant ainsi d'évaluer la distribution spatiale des impacts à une échelle spatiale plus fine.

Enfin, alors que la Figure 97 illustre une valeur unique d'impact associée à l'utilisation de l'eau pour le cycle de vie du shampoing en France, la Figure 100 met en évidence la répartition spatiale de ces impacts selon les départements français. La carte révèle, par exemple, des impacts plus marqués dans la région du Languedoc-Roussillon, au sud de la France, tandis que les impacts sont moins prononcés dans l'est du pays. De plus, lorsque des FC agrégés au niveau des départements sont utilisés, les impacts liés à la rareté de l'eau varient sur une échelle de 1.5 ordre de grandeur, avec une médiane de 0.003 m³ équivalent d'eau, comparativement à un impact de 0.006 m³ équivalent d'eau calculé avec un FC générique pour la France. Ces résultats soulignent l'importance d'effectuer des analyses avec des résolutions spatiales plus fines lorsque des FC régionalisés natifs sont disponibles.

Impacts de rareté de l'eau [m³ world eq.]

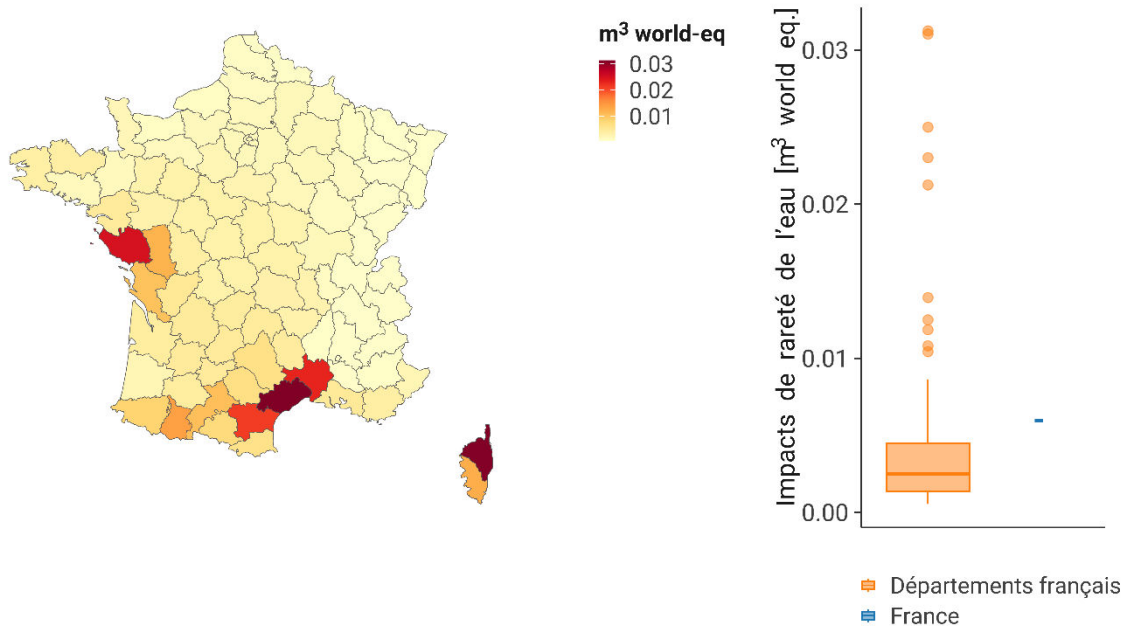


Figure 100. Spatialisation et distribution des impacts liés à la catégorie water scarcity (rareté de l'eau) associés au cycle de vie de l'utilisation de shampooing en France [m³ world eq./unité fonctionnelle]. Les impacts sont évalués selon la méthode IMPACT World+, en tenant compte des conditions d'utilisation dans les départements de la France Métropolitaine.

5.7.5 Principales conclusions

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.

5.8 Conclusions générales de l'étude de cas

La modélisation de l'étude de cas sur l'utilisation de shampoing en France a permis de montrer que les logiciels SimaPro, openLCA et Brightway offrent des possibilités spécifiques pour intégrer des aspects spatiaux dans la réalisation des études d'ACV, mais présentent également des limites et des complexités propres.

SimaPro se distingue par son intégration native de flux spatialisés via ecoinvent, notamment pour les catégories liées aux flux d'eau. Cependant, l'amélioration de la représentativité géographique des résultats nécessite de nombreuses manipulations manuelles, notamment la création de nouveaux flux élémentaires et la modification des processus d'avant et d'arrière-plan. L'intégration de FC régionalisés à une échelle différente exige des calculs extérieurs au logiciel, ce qui implique des tâches supplémentaires, mais potentiellement très enrichissant en termes de précision des résultats.

openLCA offre deux approches pour la spatialisation des impacts, avec une plus grande flexibilité que SimaPro grâce à la possibilité de calculer des FC régionalisés à l'aide de cartes *GeoJSON*. Toutefois, les FC régionalisés ne sont actuellement disponibles que pour la méthode LC-IMPACT, limitant ainsi l'éventail des options. Bien que cette approche géospatiale soit prometteuse et permette un calcul pour tous les flux et processus du système, des défis subsistent, notamment l'agrégation des résultats avec des pondérations qui ne correspondent pas toujours aux recommandations des développeurs de méthodes d'ÉICV. Le manque de méthodes d'impact disponibles et l'incertitude autour de l'agrégation limitent également son accessibilité à un plus grand nombre de praticiens.

Brightway propose deux méthodes principales pour la spatialisation : l'utilisation de la librairie *bw2-regional*, qui permet une approche géospatiale, et la spatialisation des flux élémentaires basée sur leur nom. Néanmoins, la première méthode n'a pas pu être testée à cause de problèmes techniques, et seule la deuxième approche a été explorée. L'utilisation de la base de données Regioinvent facilite la spatialisation automatisée des flux liés à des impacts environnementaux comme l'eau ou l'acidification, mais le praticien doit encore spatialiser manuellement les processus d'avant-plan. De plus, seule la méthode IMPACT World+ propose actuellement des FC régionalisés compatibles avec cette approche.

Une limitation commune à ces logiciels est la complexité d'intégration des FC régionalisés agrégés à des échelles spécifiques, qui demande souvent des manipulations avancées ou des calculs externes.

En résumé, chacun des logiciels présente des avantages et des inconvénients dans la prise en compte des aspects géographiques dans les ACV. SimaPro et openLCA offrent des approches plus établies, mais avec des limites en termes de flexibilité ou d'agrégation des FC régionalisés dans le cas de ce

dernier. Brightway, bien que plus récent et avec des fonctionnalités prometteuses, nécessite des compétences en programmation Python pour exploiter pleinement son potentiel.

6. Conclusions et recommandations

6.1 Synthèse des enjeux traités et recommandations

6.1.1 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 étapes incluent :

- **Génération de cartes de distribution** : La distribution du flux élémentaires est modélisée entre différentes entités spatiales (cellules, pays, continents) en fonction de la fraction du flux atteignant chaque région.
- **Multiplication par la sensibilité** : La fraction du flux élémentaires pour chaque entité est multipliée par la sensibilité du milieu récepteur pour créer une carte des impacts associés à l'émission initiale.
- **Création de cartes spécifiques** : Une carte des impacts est produite pour chaque lieu d'émission, avec un FC distinct pour chaque milieu récepteur, entraînant un calcul de FC régionalisé origine-destination.

Cependant, les logiciels actuels ne peuvent pas gérer simultanément l'origine et la destination des impacts. Par conséquent, les méthodes d'ÉICV calculent des FC régionalisés qui ne conservent que l'information sur l'origine des émissions. Ces FC sont définis à une résolution spatiale native, qui représente la meilleure approximation de la variabilité spatiale des valeurs des FC.

L'agrégation vise à adapter les FC régionalisés natifs à une échelle cohérente avec celle de l'inventaire. 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. 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.

6.1.2 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**.

L'inventaire spatialisé résulte du processus de spatialisation, qui peut être effectué par les développeurs 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.

Une fois l'inventaire et les FC harmonisés à la même échelle, 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

6.1.3 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. Cette méthode automatise la spatialisation de l'inventaire en fonction des régions associées aux processus, grâce à des algorithmes SIG spécialisés. 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.

L'étude de cas illustre les problèmes d'opérationnalisation des deux méthodes et les défis que les

développeurs doivent encore surmonter, notamment dans la gestion de flux répétés dans le cas de la première méthode et l'agrégation des résultats dans le cas de la méthode géospatiale.

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.

6.1.4 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 permettent le calcul d'inventaires spatialisés pour tout type de flux sans avoir un dédoublement des flux élémentaires.



6.2 Conclusion

Cette étude, commandité par ScoreLCA et réalisé par le CIRAIG, visait à répondre à plusieurs objectifs principaux. Tout d'abord, il s'agissait de faire un état de l'art de la prise en compte des aspects géographiques dans le calcul des impacts en ACV. En parallèle, une étude de cas a permis de mettre en lumière les défis opérationnels liés à cette intégration, tout en explorant les pistes méthodologiques pour y remédier. Enfin, l'étude aboutit à des recommandations pour les praticiens, les développeurs de logiciels et les instances normatives, afin de promouvoir une harmonisation des pratiques dans ce domaine complexe et en pleine évolution.

Le rapport met en évidence l'importance de la cohérence entre l'échelle géographique des inventaires et celle des FC, afin d'assurer des résultats d'ACV plus précis et représentatifs des réalités locales, régionales et globales. Également, le besoin de surmonter certains défis techniques liés à l'opérationnalisation de ces méthodes dans les logiciels ACV, comme l'intégration des SIG pour la gestion des résolutions spatiales apparaît comme l'un des principaux défis.

L'étude de cas a illustré les effets des différentes méthodes de régionalisation appliquées à l'ACV à travers l'exemple de l'utilisation d'un shampoing. Elle a permis de comparer les résultats obtenus avec et sans régionalisation des inventaires et des méthodes d'ÉICV, en utilisant divers logiciels ACV (SimaPro, openLCA, Brightway). Les résultats montrent que l'amélioration de la régionalisation de l'inventaire, en termes de spécificité géographique des flux, influence significativement les résultats de l'ACV, surtout dans le cas des indicateurs liés à la consommation d'eau. L'étude a démontré que des méthodes comme IMPACT World+, LC-IMPACT et AWARE, qui incluent des FC régionalisés, permettent une évaluation plus précise des impacts environnementaux.

Les recommandations issues de ce travail encouragent les développeurs de logiciels à intégrer pleinement les approches géospatiales et à supporter des formats de données harmonisés afin de faciliter l'échange et l'utilisation des données régionalisées entre les parties prenantes. De même, pour les praticiens, il est crucial de définir des échelles géographiques adaptées aux objectifs de chaque étude ACV et adopter des stratégies pour mieux refléter les variations géographiques des impacts environnementaux et, de cette manière, améliorer la représentativité des éléments les plus contributeurs. Ceci mènera à des résultats plus représentatifs et robustes.

En somme, cette étude fournit une base solide pour améliorer l'application de la spatialisation des impacts en ACV, tout en appelant à une poursuite des recherches pour affiner ces méthodes et outiller plus efficacement les praticiens dans la gestion des impacts à différentes échelles géographiques.

7. Références

- ArcGIS. (2024a). *What is a shapefile?* [https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm#:~:text=A%20shapefile%20is%20a%20simple,%2C%20or%20polygons%20\(areas\).](https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm#:~:text=A%20shapefile%20is%20a%20simple,%2C%20or%20polygons%20(areas).)
- ArcGIS. (2024b). *What is KML?* [https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/kml/what-is-kml.htm#:~:text=KML%20\(formerly%20known%20as%20Keyhole,ArcGIS%20Earth%20and%20ArcGIS%20Pro.](https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/kml/what-is-kml.htm#:~:text=KML%20(formerly%20known%20as%20Keyhole,ArcGIS%20Earth%20and%20ArcGIS%20Pro.)
- ArcGIS. (2024c). *What is raster data?* <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Accorsi, R., Battarra, I., Guidani, B., Manzini, R., Ronzoni, M., & Volpe, L. (2022). Augmented spatial LCA for comparing reusable and recyclable food packaging containers networks. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134027>
- Alejandre, E. M., Guinée, J. B., & van Bodegom, P. M. (2022). Assessing the use of land system archetypes to increase regional variability representation in country-specific characterization factors: A soil erosion case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(3), 409–418. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02037-w>
- Aljohani, T., & Alzahrani, G. (2019). Life Cycle Assessment to Study the Impact of the Regional Grid Mix and Temperature Differences on the GHG Emissions of Battery Electric and Conventional Vehicles. *2019 SoutheastCon*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020666>
- Almeida, J., De Meyer, A., Cattrysse, D., Van Orshoven, J., Achten, W. M. J., & Muys, B. (2016). Spatial optimization of *Jatropha* based electricity value chains including the effect of emissions from land use change. *Biomass and Bioenergy*, 90, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.010>
- Ansorge, L., & Beránková, T. (2017). LCA Water Footprint AWARE Characterization Factor Based on Local Specific Conditions. *European Journal of Sustainable Development*, 6(4), Article 4. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2017.v6n4p13>
- Arbault, D., Rivière, M., Rugani, B., Benetto, E., & Tiruta-Barna, L. (2014). Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 472, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.099>
- Azevedo, L. B., van Zelm, R., Elshout, P. M. F., Hendriks, A. J., Leuven, R. S. E. W., Struijs, J., de Zwart, D., & Huijbregts, M. A. J. (2013). Species richness–phosphorus relationships for lakes and streams worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 22(12), 1304–1314. <https://doi.org/10.1111/geb.12080>
- Azevedo, L. B., van Zelm, R., Hendriks, A. J., Bobbink, R., & Huijbregts, M. A. J. (2013). Global assessment of the effects of terrestrial acidification on plant species richness. *Environmental Pollution*, 174, 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.001>
- Aziz, L., Deschênes, L., Karim, R.-A., Patouillard, L., & Bulle, C. (2018). Including metal atmospheric fate and speciation in soils for terrestrial ecotoxicity in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(11), 2178–2188. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1438-8>
- Bai, S., Ren, N., You, S., Zhao, X., Li, Y., & Wang, X. (2019). Modeling the oxygen-depleting potential and spatially differentiated effect of sewage organics in life cycle assessment for wastewater management. *Science of The Total Environment*, 655, 1071–1080. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.203>
- Beltran, A. M., Padró, R., Rota-Aguilera, M. J. L., Marull, J., Eckelman, M. J., Cirera, J., Giocoli, A., & Villalba, G. (2023). Displaying geographic variability of peri-urban agriculture environmental impacts in

- the Metropolitan Area of Barcelona: A regionalized life cycle assessment. *Science of The Total Environment*, 858, 159519. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159519>
- Belyanovskaya, A. I., Laratte, B., Rajput, V. D., Perry, N., & Baranovskaya, N. V. (2020). The Innovation of the characterisation factor estimation for LCA in the *USETOX* model. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122432. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122432>
- Benoist, A., Lanvin, C., Lefebvre, O., Godard, C., Ouedraogo, H., Riesgo Saives, M., Martz, P., Ringeissen, S., & Blin, J. (2024). Better practices for including traditional firewood in LCA: Lessons from a shea butter case study in Burkina Faso. *Environmental Impact Assessment Review*, 105, 107414. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107414>
- Bezama, A., Hildebrandt, J., & Thrän, D. (2021). Integrating Regionalized Socioeconomic Considerations onto Life Cycle Assessment for Evaluating Bioeconomy Value Chains: A Case Study on Hybrid Wood–Concrete Ceiling Elements. *Sustainability*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su13084221>
- Bhat, C. G., Mukherjee, A., & Meijer, J. P. R. (2021). Life Cycle Information Models: Parameterized Linked Data Structures to Facilitate the Consistent Use of Life-Cycle Assessment in Decision Making. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 147(4), 04021060. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000308>
- Bi, Z., Keoleian, G. A., Lin, Z., Moore, M. R., Chen, K., Song, L., & Zhao, Z. (2019). Life cycle assessment and tempo-spatial optimization of deploying dynamic wireless charging technology for electric cars. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.002>
- Biganzioli, F. S., De Laurentiis, F., Zampori, L., Sala, S., & Diaconu, E. (2018). *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods. Version 2 from ILCD to EF3.0.*
- Bos, U., Maier, S. D., Horn, R., Leistner, P., & Finkbeiner, M. (2020). A GIS based method to calculate regionalized land use characterization factors for life cycle impact assessment using LANCA®. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(7), 1259–1277. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01730-y>
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuilliere, M. J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Nunez, M., Pastor, A. V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., & Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., Bruille, V. D., Cao, V., Hauschild, M., Henderson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Lévasseur, A., Liard, G., Rosenbaum, R. K., Roy, P.-O., Shaked, S., Fantke, P., & Jolliet, O. (2019). IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(9), 1653–1674. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- Cabot, M. I., Lado, J., Bautista, I., Ribal, J., & Sanjuán, N. (2023). On the relevance of site specificity and temporal variability in agricultural LCA: A case study on mandarin in North Uruguay. *The*

International Journal of Life Cycle Assessment, 28(11), 1516–1532. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02186-6>

Cardellini, G., Valada, T., Cornillier, C., Vial, E., Dragoi, M., Goudiaby, V., Mues, V., Lasserre, B., Gruchala, A., Rørstad, P. K., Neumann, M., Svoboda, M., Sirgmets, R., Näsärö, O.-P., Mohren, F., Achten, W. M. J., Vranken, L., & Muys, B. (2018). EFO-LCI: A New Life Cycle Inventory Database of Forestry Operations in Europe. *Environmental Management*, 61(6), 1031–1047. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1024-7>

Chaudhary, A., Veronesi, F., De Baan, L., & Hellweg, S. (2015). Quantifying Land Use Impacts on Biodiversity: Combining Species–Area Models and Vulnerability Indicators. *Environmental Science & Technology*, 49(16), 9987–9995. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02507>

Chen, W., Zhang, F., Hong, J., Shi, W., Feng, S., Tan, X., & Geng, Y. (2016). Life cycle toxicity assessment on deep-brine well drilling. *Journal of Cleaner Production*, 112, 326–332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.062>

Copernicus. (2024). *Agroclimatic indicators from 1951 to 2099 derived from climate projections*. Copernicus Climate Change Service (C3S). <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-agroclimatic-indicators?tab=form>

Corella-Puertas, E., Guieu, P., Aufoujal, A., Bulle, C., & Boulay, A. (2022). Development of simplified characterization factors for the assessment of expanded polystyrene and tire wear microplastic emissions applied in a food container life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 26(6), 1882–1894. <https://doi.org/10.1111/jiec.13269>

Corella-Puertas, E., Hajjar, C., Lavoie, J., & Boulay, A.-M. (2023). MarLLCA characterization factors for microplastic impacts in life cycle assessment: Physical effects on biota from emissions to aquatic environments. *Journal of Cleaner Production*, 418, 138197. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138197>

Cosme, N., & Hauschild, M. Z. (2016). Effect Factors for marine eutrophication in LCIA based on species sensitivity to hypoxia. *Ecological Indicators*, 69, 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.04.006>

Cosme, N., & Hauschild, M. Z. (2017). Characterization of waterborne nitrogen emissions for marine eutrophication modelling in life cycle impact assessment at the damage level and global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(10), 1558–1570. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1271-5>

Cosme, N., Koski, M., & Hauschild, M. Z. (2015). Exposure factors for marine eutrophication impacts assessment based on a mechanistic biological model. *Ecological Modelling*, 317, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.09.005>

Cosme, N., Mayorga, E., & Hauschild, M. Z. (2018). Spatially explicit fate factors of waterborne nitrogen emissions at the global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(6), 1286–1296. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1349-0>

Croxatto Vega, G., Gross, A., & Birkved, M. (2021). The impacts of plastic products on air pollution—A simulation study for advanced life cycle inventories of plastics covering secondary microplastic production. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 848–865. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.008>

Dai, T. (2020). *Quantifying Life-Cycle Environmental Impacts of Food Away From Home: Focusing on On-Site Energy Demand, Inventory Regionalization, and Uncertainty Quantification*.

Damiani, M., Lamouroux, N., Pella, H., Roux, P., Loiseau, E., & Rosenbaum, R. K. (2019a). Spatialized freshwater ecosystem life cycle impact assessment of water consumption based on instream habitat change modeling. *Water Research*, 163, 114884. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114884>

- Damiani, M., Lamouroux, N., Pella, H., Roux, P., Loiseau, E., & Rosenbaum, R. K. (2019b). Spatialized freshwater ecosystem life cycle impact assessment of water consumption based on instream habitat change modeling. *Water Research*, *163*, 114884. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114884>
- Di Fulvio, F., Forsell, N., Korosuo, A., Obersteiner, M., & Hellweg, S. (2019). Spatially explicit LCA analysis of biodiversity losses due to different bioenergy policies in the European Union. *Science of The Total Environment*, *651*, 1505–1516. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.419>
- Ding, T., & Achten, W. M. J. (2022). Coupling agent-based modeling with territorial LCA to support agricultural land-use planning. *Journal of Cleaner Production*, *380*, 134914. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134914>
- Ding, T., Bourrelly, S., & Achten, W. M. J. (2020). Operationalising territorial life cycle inventory through the development of territorial emission factor for European agricultural land use. *Journal of Cleaner Production*, *263*, 121565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121565>
- Ding, T., Steubing, B., & Achten, W. M. J. (2023). Coupling optimization with territorial LCA to support agricultural land-use planning. *Journal of Environmental Management*, *328*, 116946. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116946>
- Djomo, S. N., Knudsen, M. T., Andersen, M. S., & Hermansen, J. E. (2017). Methods for regionalization of impacts of non-toxic air pollutants in life-cycle assessments often tell a consistent story. *Atmospheric Environment*, *169*, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.018>
- Döll, P., & Siebert, S. (2002). Global modeling of irrigation water requirements. *Water Resources Research*, *38*(4). <https://doi.org/10.1029/2001WR000355>
- Dong, Y., Cheng, X., Li, C., Xu, L., & Lin, W. (2023). Characterization of nitrogen emissions for freshwater eutrophication modelling in life cycle impact assessment at the damage level and urban scale. *Ecological Indicators*, *154*, 110598. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110598>
- Dong, Y., Gandhi, N., & Hauschild, M. Z. (2014). Development of Comparative Toxicity Potentials of 14 cationic metals in freshwater. *Chemosphere*, *112*, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.046>
- Donke, A. C. G., Novaes, R. M. L., Pazianotto, R. A. A., Moreno-Ruiz, E., Reinhard, J., Picoli, J. F., & Folegatti-Matsuura, M. I. da S. (2020). Integrating regionalized Brazilian land use change datasets into the ecoinvent database: New data, premises and uncertainties have large effects in the results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *25*(6), 1027–1042. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01763-3>
- Elliot, T., Torres-Matallana, J. A., Goldstein, B., Babí Almenar, J., Gómez-Baggethun, E., Proença, V., & Rugani, B. (2022). An expanded framing of ecosystem services is needed for a sustainable urban future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *162*, 112418. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112418>
- EPLCA. (2024). *Developer Environmental Footprint (EF)*. European Platform on LCA. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html>
- ESDAC. (2024). *European Soil Data Centre*. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/lucas-2018-topsoil-data>
- Fabrizi, S., Owsianiak, M., & Hauschild, M. Z. (2023). Evaluation of sugar feedstocks for bio-based chemicals: A consequential, regionalized life cycle assessment. *GCB Bioenergy*, *15*(1), 72–87. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13009>
- FAO. (2019). *FAO Statistical Areas for Fishery Purposes*. In: *FAO Fisheries and Aquaculture Department*. <https://data.apps.fao.org/map/catalog/static/api/records/ac02a460-da52-11dc-9d70-0017f293bd28>

- Frischknecht, R., & Jolliet, O. (2017). *Global Guidance on Environmental Life Cycle Impact Assessment Indicators Vol. 1*. UNEP Life Cycle Initiative.
- Frischknecht, R., & Jolliet, O. (2019). *Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators Vol. 2*. UNEP Life Cycle Initiative. <https://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-for-life-cycle-impact-assessment-indicators-volume-2/>
- Frischknecht, R., Pfister, S., Bunsen, J., Haas, A., Känzig, J., Kilga, M., Lansche, J., Margni, M., Mutel, C., Reinhard, J., Stolz, P., van Zelm, R., Vieira, M., & Wernet, G. (2019a). Regionalization in LCA: current status in c^oncepts, software and databases—69th LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 13 September, 2018. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(2), 364–369. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1559-0>
- Frischknecht, R., Pfister, S., Bunsen, J., Haas, A., Känzig, J., Kilga, M., Lansche, J., Margni, M., Mutel, C., Reinhard, J., Stolz, P., van Zelm, R., Vieira, M., & Wernet, G. (2019b). Regionalization in LCA: Current status in c^oncepts, software and databases—69th LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 13 September, 2018. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(2), 364–369. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1559-0>
- Frost, K. (2021). *SPATIALLY EXPLICIT ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS IN THE ELECTRONICS SECTOR*.
- Gade, A. L., Hauschild, M. Z., & Laurent, A. (2021). Globally differentiated effect factors for characterising terrestrial acidification in life cycle impact assessment. *Science of The Total Environment*, 761, 143280. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143280>
- Gejl, R. N., Bjerg, P. L., Henriksen, H. J., Hauschild, M. Z., Rasmussen, J., & Rygaard, M. (2018). Integrating groundwater stress in life-cycle assessments – An evaluation of water abstraction. *Journal of Environmental Management*, 222, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.058>
- Ghosh, T., Hanes, R., Key, A., Walzberg, J., & Eberle, A. (2022). The Circular Economy Life Cycle Assessment and Visualization Framework: A Multistate Case Study of Wind Blade Circularity in United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 185, 106531. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106531>
- Golsteijn, L., Lessard, L., Campion, J.-F., Capelli, A., D'Enfert, V., King, H., Kremer, J., Krugman, M., Orliac, H., Furnemont, S. R., Schuh, W., Stalmans, M., O'Hanlon, N. W., & Coroama, M. (2018). Developing Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for shampoos: The basis for comparable life cycle assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 14(5), 649–659. <https://doi.org/10.1002/ieam.4064>
- Gillies, S. (2019). Rasterio Documentation. *MapBox*, July, 23.
- Giusti, G., Da Silva, D. V., Albino, A. C. G., De Souza Tadano, Y., & Silva, D. A. L. (2023). Human health impacts of particulate matter emitted from different milk production systems in Brazil: A regionalized LCA sensitivity analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(11), 1466–1480. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02184-8>
- Heeren, N., & Hellweg, S. (2019). Tracking Construction Material over Space and Time: Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 253–267. <https://doi.org/10.1111/jiec.12739>
- Heidari, M. D., Gandasmita, S., Li, E., & Pelletier, N. (2021). Proposing a framework for sustainable feed formulation for laying hens: A systematic review of recent developments and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125585. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125585>

- Heidari, M. D., Huijbregts, M. A. J., Mobli, H., Omid, M., Rafiee, S., & Van Zelm, R. (2017). Regionalised life cycle assessment of pasta production in Iran: Damage to terrestrial ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 159, 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.073>
- Helmes, R. J. K., Huijbregts, M. A. J., Henderson, A. D., & Jolliet, O. (2012). Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(5), 646–654. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0382-2>
- Henderson, A. D., Asselin-Balençon, A. C., Heller, M., Lessard, L., Vionnet, S., & Jolliet, O. (2017). Spatial Variability and Uncertainty of Water Use Impacts from U.S. Feed and Milk Production. *Environmental Science & Technology*, 51(4), 2382–2391. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04713>
- Henriksen, T., Astrup, T. F., & Damgaard, A. (2018). Linking Data Choices and Context Specificity in Life Cycle Assessment of Waste Treatment Technologies: A Landfill Case Study. *Journal of Industrial Ecology*, 22(5), 1039–1049. <https://doi.org/10.1111/jiec.12709>
- Henriksen, T., Astrup, T. F., & Damgaard, A. (2021). Data representativeness in LCA: A framework for the systematic assessment of data quality relative to technology characteristics. *Journal of Industrial Ecology*, 25(1), 51–66. <https://doi.org/10.1111/jiec.13048>
- Henryson, K., Kätterer, T., Tidåker, P., & Sundberg, C. (2020). Soil N₂O emissions, N leaching and marine eutrophication in life cycle assessment – A comparison of modelling approaches. *Science of The Total Environment*, 725, 138332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138332>
- Hernández-Padilla, F., Margni, M., Noyola, A., Guereca-Hernandez, L., & Bulle, C. (2017). Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2140–2153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.068>
- Hijmans, R. J., Bivand, R., Forner, K., Ooms, J., Pebesma, E., & Sumner, M. D. (2022). Package ‘terra’. *Maintainer: Vienna, Austria*.
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Jordan, C.-M., Giroux, B., Næss, J. S., Hu, X., Cavalett, O., & Cherubini, F. (2023). Energy potentials, negative emissions, and spatially explicit environmental impacts of perennial grasses on abandoned cropland in Europe. *Environmental Impact Assessment Review*, 98, 106942. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106942>
- Jordan, C.-M., Kuipers, K. J. J., Huang, B., Hu, X., Verones, F., & Cherubini, F. (2023). Spatially and taxonomically explicit characterisation factors for greenhouse gas emission impacts on biodiversity. *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107159. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107159>
- Jacquet, L., le Duigou, A., & Kerbrat, O. (2024). A systematic literature review on holistic lifecycle assessments as a basis to create a standard in maritime industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02269-4>
- Johnsen, F. M. (2014). Bridging Arctic environmental science and life cycle assessment: A preliminary assessment of regional scaling factors. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(8), 1713–1724. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0752-5>

- Jordaan, S. M., Patterson, L. A., & Anadon, L. D. (2018). A spatially-resolved inventory analysis of the water consumed by the coal-to-gas transition of Pennsylvania. *Journal of Cleaner Production*, *184*, 366–374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.217>
- Jordahl, K., Van den Bossche, J., Wasserman, J., McBride, J., Gerard, J., Tratner, J., Perry, M., & Farmer, C. (2021). Geopandas/geopandas: V0. 5.0. *Zenodo*.
- Jouannais, P., Hindersin, S., Löhn, S., & Pizzol, M. (2022). Stochastic LCA Model of Upscaling the Production of Microalgal Compounds. *Environmental Science & Technology*, *56*(14), 10454–10464. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c00372>
- Joyce, P. J., & Björklund, A. (2022). Futura: A new tool for transparent and shareable scenario analysis in prospective life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, *26*(1), 134–144. <https://doi.org/10.1111/jiec.13115>
- Karim, R.-A., Deschênes, L., & Bulle, C. (2019). Regionalized aquatic ecotoxicity characterization factor for zinc emitted to soil accounting for speciation and the transfer through groundwater. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *24*(11), 2008–2022. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01633-7>
- Karimpour, S., Boulay, A.-M., & Bulle, C. (2021). Evaluation of sector-specific AWARE characterization factors for water scarcity footprint of electricity generation. *Science of The Total Environment*, *753*, 142063. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142063>
- Klein, N., Herzog, F., Jeanneret, P., & Kay, S. (2023). Validating Farmland Biodiversity Life Cycle Assessment at the Landscape Scale. *Environmental Science & Technology*, *57*(25), 9184–9193. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09677>
- Ko, N., Betten, T., Schestak, I., & Gantner, J. (2017). LCA in space – current status and future development. *Matériaux & Techniques*, *105*(5–6), 507. <https://doi.org/10.1051/mattech/2018003>
- Kounina, A., Margni, M., Henderson, A. D., & Jolliet, O. (2019). Global spatial analysis of toxic emissions to freshwater: Operationalization for LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *24*(3), 501–517. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1476-2>
- Kuczenski, B., Davis, C. B., Rivela, B., & Janowicz, K. (2016). Semantic catalogs for life cycle assessment data. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 1109–1117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.216>
- Kuipers, K. J. J., Hilbers, J. P., Garcia-Ulloa, J., Graae, B. J., May, R., Verones, F., Huijbregts, M. A. J., & Schipper, A. M. (2021). Habitat fragmentation amplifies threats from habitat loss to mammal diversity across the world's terrestrial ecoregions. *One Earth*, *4*(10), 1505–1513. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.09.005>
- Langlois, J., Fréon, P., Delgenes, J.-P., Steyer, J.-P., & Hélias, A. (2014). New methods for impact assessment of biotic-resource depletion in life cycle assessment of fisheries: Theory and application. *Journal of Cleaner Production*, *73*, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.087>
- Lathuillière, M. J., Miranda, E. J., Bulle, C., Couto, E. G., & Johnson, M. S. (2017). Land occupation and transformation impacts of soybean production in Southern Amazonia, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *149*, 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.120>
- Lathuillière, M. J., Patouillard, L., Margni, M., Ayre, B., Löfgren, P., Ribeiro, V., West, C., Gardner, T. A., & Suavet, C. (2021). A commodity supply mix for more regionalized life cycle assessments. *Environmental Science & Technology*, *55*(17), 12054–12065. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03060>
- Leão, S., Roux, P., Núñez, M., Loiseau, E., Junqua, G., Sferratore, A., Penru, Y., & Rosenbaum, R. K. (2018). A worldwide-regionalised water supply mix (WSmix) for life cycle inventory of water use. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 302–313. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.135>

- Lee, E. K., Zhang, W.-J., Zhang, X., Adler, P. R., Lin, S., Feingold, B. J., Khwaja, H. A., & Romeiko, X. X. (2020). Projecting life-cycle environmental impacts of corn production in the U.S. Midwest under future climate scenarios using a machine learning approach. *Science of The Total Environment*, 714, 136697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136697>
- Lee, K., Chun, S., Bielicki, J. M., & Bakshi, B. R. (2023). Spatially-explicit absolute life cycle assessment by multi-regional hybrid modeling: Computational framework. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139789. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139789>
- Lesage, P., & Samson, R. (2016). The Quebec Life Cycle Inventory Database Project. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1282–1289. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0593-1>
- Li, D., Dorber, M., Barbarossa, V., & Veronesi, F. (2022). Global characterization factors for quantifying the impacts of increasing water temperature on freshwater fish. *Ecological Indicators*, 142, 109201. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109201>
- Li, J., Tian, Y., & Xie, K. (2023). Coupling big data and life cycle assessment: A review, recommendations, and prospects. *Ecological Indicators*, 153, 110455. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110455>
- Li, R., Zhang, H., Wang, H., Tu, Q., & Wang, X. (2019). Integrated hybrid life cycle assessment and contribution analysis for CO₂ emission and energy consumption of a concentrated solar power plant in China. *Energy*, 174, 310–322. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.066>
- Liao, X. (2022). *Regionalized Life Cycle Assessment of Food and Energy Systems* [Dissertation]. EPFL.
- Lin, C.-C., & Chiueh, P.-T. (2021). Mapping the local impacts of water consumption with regionalized three-dimensional arrays. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(7), 1495–1504. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01886-1>
- Liu, X., & Bakshi, B. R. (2019). Ecosystem Services in Life Cycle Assessment while Encouraging Techno-Ecological Synergies. *Journal of Industrial Ecology*, 23(2), 347–360. <https://doi.org/10.1111/jiec.12755>
- Loiseau, E., Aissani, L., Le Féon, S., Laurent, F., Cerceau, J., Sala, S., & Roux, P. (2018). Territorial Life Cycle Assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 176, 474–485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.169>
- Loiseau, E., Colin, M., Alaphilippe, A., Coste, G., & Roux, P. (2020). To what extent are short food supply chains (SFSCs) environmentally friendly? Application to French apple distribution using Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124166>
- Lorenz, M., Ko, N., Knüpfner, E., & Baumann, M. (2017). Life cycle assessment (LCA) of solar thermal tower power plants. *Matériaux & Techniques*, 105(5–6), Article 5–6. <https://doi.org/10.1051/mattech/2018002>
- Loubet, P., Maury, T., Micolier, A., Sonnemann, G., Hélias, A., Pôle, E., & Assessment, S. (2020). *Development of a parsimonious characterisation model to address space debris emission-related damages for the LCA of space systems*.
- Ma, X., Qi, C., Ye, L., Yang, D., & Hong, J. (2017). Life cycle assessment of tungsten carbide powder production: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 149, 936–944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.184>
- Maesele, C., & Roux, P. (2021). An LCA framework to assess environmental efficiency of water reuse: Application to contrasted locations for wastewater reuse in agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128151. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128151>

- Maier, M., Mueller, M., & Yan, X. (2017). Introducing a localised spatio-temporal LCI method with wheat production as exploratory case study. *Journal of Cleaner Production*, *140*, 492–501. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.160>
- Maier, S. D., Lindner, J. P., & Francisco, J. (2019). Conceptual Framework for Biodiversity Assessments in Global Value Chains. *Sustainability*, *11*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su11071841>
- Marzullo, R. D. C. M., Matai, P. H. L. D. S., & Morita, D. M. (2018). New method to calculate water ecotoxicity footprint of products: A contribution to the decision-making process toward sustainability. *Journal of Cleaner Production*, *188*, 888–899. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.307>
- Maurice, E., Dandres, T., Farrahi Moghaddam, R., Nguyen, K., Lemieux, Y., Cherriet, M., & Samson, R. (2014). *Modelling of Electricity Mix in Temporal Differentiated Life-Cycle-Assessment to Minimize Carbon Footprint of a Cloud Computing Service: ICT for Sustainability 2014 (ICT4S-14)*, Stockholm, Sweden. <https://doi.org/10.2991/ict4s-14.2014.35>
- McAuliffe, G. A., Takahashi, T., Orr, R. J., Harris, P., & Lee, M. R. F. (2018). Distributions of emissions intensity for individual beef cattle reared on pasture-based production systems. *Journal of Cleaner Production*, *171*, 1672–1680. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.113>
- Megange, P., Ngae, P., Feiz, A.-A., & Le, T.-P. (2020). Dynamic site-dependent Life Cycle Assessment for assessing impact of human toxicity of a double glazed PVC window. *Procedia CIRP*, *90*, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.056>
- Meron, N., Blass, V., & Thoma, G. (2020). Selection of the most appropriate life cycle inventory dataset: New selection proxy methodology and case study application. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *25*(4), 771–783. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01721-8>
- Messmann, L., Wietschel, L., Thorenz, A., & Tuma, A. (2023). Assessing the social dimension in strategic network optimization for a sustainable development: The case of bioethanol production in the EU. *Journal of Industrial Ecology*, *27*(3), 760–776. <https://doi.org/10.1111/jiec.13324>
- Meyer, R., Benetto, E., Mauny, F., & Lavandier, C. (2019). Characterization of damages from road traffic noise in life cycle impact assessment: A method based on emission and propagation models. *Journal of Cleaner Production*, *231*, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.185>
- Micolier, A., Loubet, P., Taillandier, F., & Sonnemann, G. (2019). To what extent can agent-based modelling enhance a life cycle assessment? Answers based on a literature review. *Journal of Cleaner Production*, *239*, 118123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118123>
- Milovanoff, A., Posen, I. D., & MacLean, H. L. (2021). Quantifying environmental impacts of primary aluminum ingot production and consumption: A trade-linked multilevel life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, *25*(1), 67–78. <https://doi.org/10.1111/jiec.13051>
- Morais, T. G., Silva, C., Jebari, A., Álvaro-Fuentes, J., Domingos, T., & Teixeira, R. F. M. (2018). A proposal for using process-based soil models for land use Life cycle impact assessment: Application to Alentejo, Portugal. *Journal of Cleaner Production*, *192*, 864–876. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.061>
- Morais, T. G., Teixeira, R. F., & Domingos, T. (2017). A step toward regionalized scale-consistent agricultural life cycle assessment inventories. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *13*(5), 939–951. <https://doi.org/10.1002/ieam.1889>
- Morais, T. G., Teixeira, R. F. M., & Domingos, T. (2016). Regionalization of agri-food life cycle assessment: A review of studies in Portugal and recommendations for the future. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(6), 875–884. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1055-3>

- Morales, M., Moraga, G., Kirchheim, A. P., & Passuello, A. (2019). Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117869>
- Mutel, C. (2014). *bw2-regional: Regionalization in Brightway2*. <https://brightway2-regional.readthedocs.io/>
- Mutel, C. (2017). Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment. *The Journal of Open Source Software*, 2(12), 236. <https://doi.org/10.21105/joss.00236>
- Mutel, C., Liao, X., Patouillard, L., Bare, J., Fantke, P., Frischknecht, R., Hauschild, M., Jolliet, O., Maia de Souza, D., Laurent, A., Pfister, S., & Veronesi, F. (2019). Overview and recommendations for regionalized life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(5), 856–865. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1539-4>
- Natural Earth. (2024a). *Country boundaries (subunits), Admin 0, version 4.1.0*. file:///C:/Users/ivive/Documents/ciraig/21_spatialisation/data/ne_10m_urban_areas/ne_10m_urban_areas.README.html
- Natural Earth. (2024b). *Urban Areas. Area of dense human habitation*. <https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/10m-urban-area/>
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., & Kassem, K. R. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- Patouillard, L., Bulle, C., & Margni, M. (2016). Ready-to-use and advanced methodologies to prioritise the regionalisation effort in LCA. *Matériaux & Techniques*, 104(1), 105. <https://doi.org/10.1051/mattech/2016002>
- Patouillard, L., Bulle, C., Querleu, C., Maxime, D., Osset, P., & Margni, M. (2018). Critical review and practical recommendations to integrate the spatial dimension into life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 177, 398–412. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.192>
- Patouillard, L., Bulle, C., Querleu, C., Maxime, D., & Patreau, V. (2015). Prise en compte de la dimension géographique en ACV: intérêts et mise en oeuvre. *Final Report SCORELCA Foundation*.
- Patouillard, L., Collet, P., Lesage, P., Seco, P. T., Bulle, C., & Margni, M. (2019). Prioritizing regionalization efforts in life cycle assessment through global sensitivity analysis: A sector meta-analysis based on ecoinvent v3. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(12), 2238–2254. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01635-5>
- PERULCA. (2024). *Base de datos Perú LCA*. <https://perulca.com/ingresa/>
- Pebesma, E. J. (2018). Simple features for R: standardized support for spatial vector data. *R J.*, 10(1), 439.
- Pfister, S., Koehler, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environmental Science & Technology*, 43(11), 4098–4104. <https://doi.org/10.1021/es802423e>
- Pfister, S., Oberschelp, C., & Sonderegger, T. (2020). Regionalized LCA in practice: The need for a universal shapefile to match LCI and LCIA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(10), 1867–1871. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01816-7>
- Piao, Z., Heutschi, K., Pieren, R., Mikhailenko, P., Poulikakos, L. D., & Hellweg, S. (2022). Environmental trade-offs for using low-noise pavements: Life cycle assessment with noise

- considerations. *Science of The Total Environment*, 842, 156846. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156846>
- Potting, J., Schöpp, W., Blok, K., & Hauschild, M. (1998). Site-Dependent Life-Cycle Impact Assessment of Acidification. *Journal of Industrial Ecology*, 2(2), 63–87. <https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.2.63>
- Raghu, K., Aalto, M., Korpinen, O.-J., Ranta, T., & Proskurina, S. (2020). Lifecycle Assessment of Biomass Supply Chain with the Assistance of Agent-Based Modelling. *Sustainability*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su12051964>
- Roy, P.-O., Azevedo, L. B., Margni, M., Van Zelm, R., Deschênes, L., & Huijbregts, M. A. J. (2014). Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: A systematic analysis of spatial variability and uncertainty. *Science of The Total Environment*, 500–501, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.099>
- Roy, P.-O., Ménard, J.-F., Fallaha, S., & Samson, R. (2016). Analyse du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation Québécois. *CIRAIG, Hydro-Quebec*.
- Rugani, B., Maia De Souza, D., Weidema, B. P., Bare, J., Bakshi, B., Grann, B., Johnston, J. M., Pavan, A. L. R., Liu, X., Laurent, A., & Veronesi, F. (2019). Towards integrating the ecosystem services cascade framework within the Life Cycle Assessment (LCA) cause-effect methodology. *Science of The Total Environment*, 690, 1284–1298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.023>
- Rydgård, M., Jensen, L. S., Kroeze, C., Strokal, M., Möller, K., & Bruun, S. (2024). Regionalised modelling of recycled fertiliser P in agricultural fields: Development of the life cycle inventory model PLCI 2.0. *Journal of Cleaner Production*, 443, 141088. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141088>
- Scherer, L., Gürdal, İ., & Van Bodegom, P. M. (2022). Characterization factors for ocean acidification impacts on marine biodiversity. *Journal of Industrial Ecology*, 26(6), 2069–2079. <https://doi.org/10.1111/jiec.13274>
- Scherer, L., & Pfister, S. (2015). Modelling spatially explicit impacts from phosphorus emissions in agriculture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(6), 785–795. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0880-0>
- Serafini, S., & Cirotto, A. (2024). *LC-Impact method documentation. openLCA 2.1.1*. <https://nexus.openlca.org/database/LC-Impact%20LCIA%20Method>
- Sonderegger, T., Pfister, S., & Hellweg, S. (2020). Assessing Impacts on the Natural Resource Soil in Life Cycle Assessment: Methods for Compaction and Water Erosion. *Environmental Science & Technology*, 54(11), 6496–6507. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01553>
- Spalding, M. D., Fox, H. E., Allen, G. R., Davidson, N., Ferdaña, Z. A., Finlayson, M., Halpern, B. S., Jorge, M. A., Lombana, A., Lourie, S. A., Martin, K. D., McManus, E., Molnar, J., Recchia, C. A., & Robertson, J. (2007). Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas. *BioScience*, 57(7), 573–583. <https://doi.org/10.1641/B570707>
- Sphera. (2022). *GaBi. Introduction to Water Use Assessment*. <https://sphera.com/wp-content/uploads/2022/02/Introduction-to-Water-Use-Assessment-in-GaBi-2022.pdf>
- SICV Brasil. (2024). *Banco Nacional de Inventarios do Ciclo de Vida*. <https://sicv.acv.ibict.br/index.xhtml?stock=default>
- Steubing, B., De Koning, D., Haas, A., & Mutel, C. L. (2020). The *Activity Browser*—An open source rightway software building on top of the brightway framework. *Software Impacts*, 3, 100012. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2019.100012>

- Taelman, S., Sanjuan-Delmás, D., Tonini, D., & Dewulf, J. (2020). An operational framework for sustainability assessment including local to global impacts: Focus on waste management systems. *Resources, Conservation and Recycling*, *162*, 104964. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104964>
- Teixeira, R. F. M., Morais, T. G., & Domingos, T. (2018). Consolidating Regionalized Global Characterization Factors for Soil Organic Carbon Depletion Due to Land Occupation and Transformation. *Environmental Science & Technology*, *52*(21), 12436–12444. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00721>
- Trottier, G. (2021). *Assessing the impacts of hydropower, dams and reservoirs on macroinvertebrate richness as a general portrait and within the Life Cycle Assessment (LCA) framework*.
- Turgeon, K., Trottier, G., Turpin, C., Bulle, C., & Margni, M. (2021). Empirical characterization factors to be used in LCA and assessing the effects of hydropower on fish richness. *Ecological Indicators*, *121*, 107047. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107047>
- Van Zelm, R., Preiss, P., Van Goethem, T., Van Dingenen, R., & Huijbregts, M. (2016). Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: Damage to human health and vegetation. *Atmospheric Environment*, *134*, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.044>
- Vea, E. B., Bendtsen, J., Richardson, K., Ryberg, M., & Hauschild, M. (2022). Spatially differentiated marine eutrophication method for absolute environmental sustainability assessments. *Science of The Total Environment*, *843*, 156873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156873>
- Verones, F., Hellweg, S., Antón, A., Azevedo, L. B., Chaudhary, A., Cosme, N., Cucurachi, S., de Baan, L., Dong, Y., Fantke, P., Golsteijn, L., Hauschild, M., Heijungs, R., Jolliet, O., Juraske, R., Larsen, H., Laurent, A., Mutel, C. L., Margni, M., ... Huijbregts, M. A. J. (2020). LC-IMPACT: A regionalized life cycle damage assessment method. *Journal of Industrial Ecology*, *24*(6), 1201–1219. <https://doi.org/10.1111/jiec.13018>
- Verones, F., Pfister, S., van Zelm, R., & Hellweg, S. (2017). Biodiversity impacts from water consumption on a global scale for use in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(8), 1247–1256. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1236-0>
- Villanueva-Rey, P., Vázquez-Rowe, I., Quinteiro, P., Rafael, S., Gonçalves, C., Moreira, M. T., Feijoo, G., Arroja, L., & Dias, A. C. (2019). Regionalizing eco-toxicity characterization factors for copper soil emissions considering edaphic information for Northern Spain and Portuguese vineyards. *Science of The Total Environment*, *686*, 986–994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.376>
- Viveros Santos, I., Bulle, C., Levasseur, A., & Deschênes, L. (2018). Regionalized Terrestrial Ecotoxicity Assessment of Copper-Based Fungicides Applied in Viticulture. *Sustainability*, *10*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su10072522>
- Viveros Santos, I., Roux, P., Bulle, C., Levasseur, A., & Deschênes, L. (2020). *AGEC-LCI: an open access tool for calculating emissions from fertilizers and metal-based fungicides applications*.
- WorldClim. (2024). *Global climate and weather data*. <https://www.worldclim.org/data/index.html>
- WULCA. (2024). *Input data (WaterGAP) [dataset]*. <https://wulca-waterlca.org/aware/input-data-watergap/>

8. Annexes

8.1 Détail du calcul des FC agrégés dans IMPACT World+

L'agrégation des FC régionalisés natifs dans la méthode IMPACT World+ se fait à l'aide de l'équation suivante (Bulle et al., 2019; Patouillard, 2018):

$$aggFC_{j,k} = \sum_{i=1}^I (natFC_{i,k} \times w_{i,j,k})$$

Où :

- $natFC_{i,k}$ est le FC régionalisé natif pour la région i et le flux élémentaire k
- $w_{i,j,k}$ est le facteur de pondération calculé comme suit :

$$w_{i,j,k} = f_{i,j} \times \frac{e_{i,k}}{e_{j,k}}$$

Avec $f_{i,j}$ représentant la fraction surfacique de la région native i appartenant à la région d'agrégation j , $e_{i,k}$ la quantité de flux élémentaire dans la région i , et $e_{j,k}$ la quantité de flux élémentaire dans la région j .

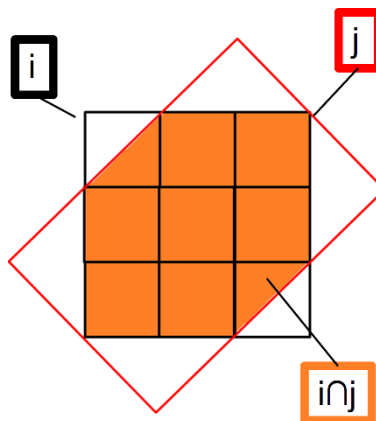


Figure 101. Intersections entre les régions de la résolution native i avec une région d'agrégation j . Tiré de Patouillard (2018)

8.2 Méthodes d'ÉICV les plus récentes

Cette section présente des tableaux complémentaires à la section 3.4.1 portant sur la revue des méthodes d'ÉICV les plus récentes.

Tableau 22. Niveau de régionalisation des catégories d'impacts orientés problème et dommage dans IMPACT World+ (Bulle et al., 2019). Caractères gras : Nouveau dans ce rapport.

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
Utilisation de l'eau	Problème	Impacts de l'utilisation de l'eau	Variation du débit à l'embouchure du fleuve sur la base d'un modèle hydrologique.	>10.000 bassins versants	Agrégation par pays, continent et globale en considérant l'utilisation de l'eau comme facteur de pondération
Utilisation de l'eau	Dommage	Impacts de l'utilisation de l'eau, santé humaine	Échelle croisée entre les bassins versants (facteurs pris en compte : disponibilité de l'eau et intensité d'utilisation) et les pays (facteur pris en compte : capacité d'adaptation des pays selon leur richesse)	808 cellules issues du croisement des bassins versants et des pays	Agrégation par pays, continent et globale en utilisant l'utilisation de l'eau comme facteur de pondération
Utilisation de l'eau	Dommage	Impacts de l'utilisation de l'eau, Écosystèmes aquatiques	Variation du débit à l'embouchure en fonction de la quantité d'eau prélevée	Échelle des bassins versants, mais tous les bassins versants de la planète qui ne sont pas couverts par le modèle	Agrégation globale uniquement, basée sur l'utilisation de l'eau dans les bassins versants pour lesquels un FC est disponible.
Acidification terrestre	Problème et dommage	Acidification terrestre	Transport atmosphérique et déposition, sensibilité des sols récepteurs, sensibilité des espèces dans les régions réceptrices	Grille mondiale de 2° x 2.5°	Agrégation par pays, par continent et globale en utilisant les émissions dans chaque cellule comme facteur de pondération
Acidification aquatique (eau douce)	Problème et dommage	Acidification aquatique (eau douce)	Transport atmosphérique et déposition, sensibilité des sols récepteurs, transport vers les cours d'eau, sensibilité des espèces dans les régions réceptrices	Grille mondiale de 2° x 2.5°	Agrégation par pays, par continent et globale en utilisant les émissions dans chaque cellule comme facteur de pondération

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
Eutrophisation aquatique (eau douce)	Problème et dommage	Eutrophisation aquatique (eau douce)	Devenir des composés phosphorés dans l'eau (en tenant compte de l'hydrologie et des différents mécanismes d'enlèvement). Le facteur d'effet n'est pas régionalisé.	Grille mondiale de 0.5° x 0.5°	Agrégation par pays, par continent et globale en utilisant la densité de population dans chaque cellule comme facteur de pondération en guise de proxy des émissions de composés phosphorés
Eutrophisation aquatique (marine)	Problème et dommage	Eutrophisation aquatique (marine)	Pas de régionalisation pour les émissions à l'eau, pour les émissions à l'air : devenir atmosphérique et déposition dans les zones côtière (même modèle atmosphérique que pour l'acidification terrestre et marine)	Grille mondiale de 2° x 2.5°	Agrégation par pays, par continent et globale en utilisant les émissions dans chaque cellule comme facteur de pondération
Cancérogène	Problème et dommage	Cancérogène, court terme	Approche par archétypes basée sur la densité de population (<i>indoor / urban / other</i>) d'une part + Paramétrisation continentale de <i>USEtox</i>	Archétypes (<i>indoor / urban / other</i>)	Pas d'agrégation : soit utilisation de la version par défaut de <i>USEtox</i> pour les FC <i>global default</i> , soit des versions continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Cancérogène	Problème et dommage	Cancérogène, long terme	Approche par archétypes basée sur la densité de population (<i>indoor / urban / other</i>) d'une part + Paramétrisation continentale de <i>USEtox</i>	Archétypes (<i>indoor / urban / other</i>)	Pas d'agrégation : soit utilisation de la version par défaut de <i>USEtox</i> pour les FC <i>global default</i> , soit des versions continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Non cancérogène	Problème et dommage	Non cancérogène, court terme	Approche par archétypes basée sur la densité de population (<i>indoor / urban /</i>	Archétypes (<i>indoor / urban / other</i>)	Pas d'agrégation : soit utilisation de la version par défaut de <i>USEtox</i> pour les FC <i>global default</i> , soit des versions

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
			<i>other</i>) d'une part + Paramétrisation continentale de <i>USEtox</i>		continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Non cancérigène	Problème et dommage	Non cancérigène, long terme	Approche par archétypes basée sur la densité de population (<i>indoor / urban / other</i>) d'une part + Paramétrisation continentale de <i>USEtox</i>	Archétypes (<i>indoor / urban / other</i>)	Pas d'agrégation : soit utilisation de la version par défaut de <i>USEtox</i> pour les FC <i>global default</i> , soit des versions continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Respiratoires inorganiques	Problème et dommage	Respiratoires inorganiques	Approche par archétypes basée sur la densité de population (<i>indoor / urban / rural / remote</i>) d'une part + sur la hauteur d'émission + Paramétrisation continentale basée sur l'âge de la population qui modifie la sensibilité aux particules fines	Archétypes (<i>indoor / urban / rural / remote, high stack...</i>)	Pas d'agrégation : soit utilisation de la version par défaut du modèle pour les FC <i>global default</i> , soit des versions continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Écotoxicité (eau douce)	Problème et dommage	Écotoxicité (eau douce)	Approche par archétypes basée sur la densité de population (<i>indoor / urban / other</i>) d'une part + Paramétrisation continentale de <i>USEtox</i>	Archétypes (<i>indoor / urban / other</i>)	Pas d'agrégation : soit utilisation de la version par défaut de <i>USEtox</i> pour les FC <i>global default</i> , soit des versions continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Utilisation des terres	Problème et dommage	Utilisation des terres, biodiversité	Mesure empirique des disparitions d'espèces selon les biomes et les types d'usages des terres	Échelle des biomes WWF	Agrégation par pays, par continent, globale en utilisant la surface comme facteur de pondération
Utilisation des terres	Problème et dommage	Occupation des terres, biodiversité	Mesure empirique des disparitions d'espèces selon les biomes et les	Échelle des biomes WWF	Agrégation par pays, par continent, globale en utilisant la surface comme facteur de pondération

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
			types d'usages des terres		

Tableau 23. Catégories d'impact orientées problème et dommage dans ReCiPe 2016 qui incluent un certain niveau de régionalisation (Huijbregts et al., 2017).

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
Formation de particules fines	Problème et dommage	Augmentation des maladies respiratoires	Fraction prise et facteur d'effet basés sur la densité de population et la concentration de fond des émissions.	Grille mondiale de 1° x 1°	Agrégation par pays (ou région), continent et globale en utilisant une moyenne pondérée par surface (Van Zelm et al., 2016).
Formation photochimique d'ozone	Problème et dommage	Augmentation des maladies respiratoires	Fraction prise et facteur d'effet basés sur la densité de population et la concentration de fond des émissions.	Grille mondiale de 1° x 1°	Agrégation par pays (ou région), continent et globale en utilisant une moyenne pondérée par surface (Van Zelm et al., 2016).
Acidification terrestre	Problème et dommage	Acidification terrestre	Transport atmosphérique et déposition, sensibilité des sols récepteurs, sensibilité des espèces dans les régions réceptrices	Grille mondiale de 2° x 2.5°	Agrégation par pays, par continent et globale en utilisant les émissions dans chaque cellule comme facteur de pondération (Roy et al., 2014).
Eutrophisation aquatique (eau douce)	Problème et dommage	Eutrophisation aquatique (eau douce)	Devenir des composés phosphorés dans l'eau (en tenant compte de l'hydrologie et des différents mécanismes d'enlèvement). Le facteur d'effet n'est pas régionalisé.	Grille mondiale de 0.5° x 0.5°	Agrégation par pays, par continent et globale en utilisant la densité de population dans chaque cellule comme facteur de pondération en guise de proxy des émissions de composés phosphorés (Helmes et al., 2012).
Utilisation de l'eau	Problème et dommage	Impacts de l'utilisation de l'eau	Santé humaine : malnutrition	Bassins versants	Agrégation par pays et globale; cependant, la méthode d'agrégation

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
			causée par pénurie d'eau. Écosystèmes aquatiques : perte de poissons à cause d'une réduction du débit fluvial. Écosystèmes terrestres : réduction de la productivité primaire nette (proxy de la perte d'espèces) à cause de la pénurie d'eau.		n'est pas précisée (Döll & Siebert, 2002; Hoekstra & Mekonnen, 2012; Pfister et al., 2009)

Tableau 24. Catégories d'impacts orientés problème dans EF (EPLCA, 2024))

Impact catégorie	Unités	Méthode recommandée
Changement climatique	kg CO ₂ eq	Modèle de référence de 100 ans du GIEC (basé sur le GIEC 2013)
Appauvrissement d'ozone	kg CFC-11eq	ODP à l'état stationnaire comme dans (OMM, 1999)
Toxicité humaine, cancer	CTUh	Modèle USEtox 2.1. (Rosenbaum et al, 2008)
Toxicité humaine, non-cancer	CTUh	Modèle USEtox 2.1. (Rosenbaum et al, 2008)
Particules/matières inorganiques respiratoires	Incidence des maladies	Méthode PM recommandée par PNUE (UNEP 2016)
Rayonnements ionisants, santé humaine	kBq U ²³⁵	Modèle d'effet sur la santé humaine développé par Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) telle qu'elle est appliquée dans ReCiPe 2008
Acidification	mol H ⁺ eq	Dépassement cumulé (Seppälä et al. 2006, Posch et coll., 2008)
Eutrophisation terrestre	mol N eq	Dépassement cumulé (Seppälä et al. 2006, Posch et coll., 2008)
Eutrophisation aquatique	kg P eq	Modèle EUTREND (Struijs et al, 2009) telle qu'elle a été mise en œuvre dans ReCiPe
Eutrophisation marine	kg N eq	Modèle EUTREND (Struijs et al, 2009) telle qu'elle a été mise en œuvre dans ReCiPe

Impact catégorie	Unités	Méthode recommandée
Écotoxicité aquatique	CTUe	Modèle <i>USEtox</i> 2.1. (Rosenbaum et al, 2008)
Utilisation des terres	Adimensionnelle	Indice de qualité du sol basé sur LANCA (Beck et al., 2010 et Bos et al., 2016)
Utilisation de l'eau	<i>m³-world equivalents</i>	Potential de privation des utilisateurs (consommation d'eau pondérée par la privation)
Utilisation des ressources fossiles	MJ	Épuisement des ressources abiotiques, combustibles fossiles (ADP-fossile)
Utilisation des ressources, minéraux et métaux	kg équivalents Sb	Épuisement des ressources abiotiques (réserve ultime ADP)

Tableau 25. Catégories d'impacts orientés problème et dommage dans LC-IMPACT qui incluent un certain niveau de régionalisation (Verones et al., 2020).

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
Formation photochimique d'ozone	Dommage	Augmentation des maladies respiratoires Plantes vasculaires	Fraction prise et facteur d'effet basés sur la densité de population et la concentration de fond des émissions.	Grille mondiale de 1° x 1°, 56 régions	Agrégation par pays (ou région), continent et globale en utilisant une moyenne pondérée par surface (Van Zelm et al., 2016).
Formation de particules fines	Dommage	Augmentation des maladies respiratoires	Fraction prise et facteur d'effet basés sur la densité de population et la concentration de fond des émissions.	Grille mondiale de 1° x 1°, 56 régions	Agrégation par pays (ou région), continent et globale en utilisant une moyenne pondérée par surface (Van Zelm et al., 2016).
Acidification terrestre	Dommage	Impacts chez des plantes vasculaires	Facteur de sensibilité du sol (H+) et facteur d'effet.	Grille mondiale de 2° x 2.5°	Agrégation par pays basée sur la probabilité des émissions (Azevedo, van Zelm, Hendriks, et al., 2013; Roy et al., 2014).

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
Stress terrestre	Dommage	Impacts sur les mammifères, les oiseaux, les reptiles, les amphibiens et les plantes vasculaires.	Six types d'utilisations de terres.	804 écorégions terrestres	Agrégation par pays basée sur la probabilité des interventions (Chaudhary et al., 2015)
Toxicité	Dommage	Cancérigène Non-cancérigène	Approche par archétypes basée sur la densité de population (indoor / urban / other d'une part + Paramétrisation continentale de <i>USEtox</i>	16 régions sub-continentales	Pas d'agrégat on : soit utilisation de la version par défaut de <i>USEtox</i> pour les FC <i>global default</i> , soit des versions continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Écotoxicité	Dommage	Impacts chez les espèces marines et d'eau douce	Paramétrisation continentale de <i>USEtox</i>	16 régions sub-continentales	Pas d'agrégat on : soit utilisation de la version par défaut de <i>USEtox</i> pour les FC <i>global default</i> , soit des versions continentales pour les FC par continents. Dans les deux cas, les FC des différents archétypes sont disponibles.
Eutrophisation aquatique (eau douce)	Dommage	Impacts chez les poissons	Réduction de la richesse en espèces de poissons due aux émissions	449 régions	Agrégation par pays basée sur la probabilité des émissions

Groupe d'impacts	Orientation	Impact	Facteur de variabilité géographique pris en compte	Niveau de régionalisation des FC natifs	Niveau et méthode d'agrégation des FC
			de phosphore dans l'eau.		(Azevedo, van Zelm, Elshout, et al., 2013; Helmes et al., 2012; Scherer & Pfister, 2015)
Eutrophisation aquatique (eau marine)	Dommmage	Impacts chez des poissons (osseux et cartilagineux), crustacés, mollusques, échinodermes, annélides et cnidaires	Réduction de la richesse en espèces animales marines induite par l'hypoxie due aux émissions d'azote inorganique dissous (DIN).	Bassins fluviaux jusqu'aux grands écosystèmes marins (5 772 paires)	Agrégation par pays basée sur la probabilité des émissions (Cosme et al., 2015, 2018; Cosme & Hauschild, 2016, 2017).
Stress hydrique	Dommmage	Impacts sur les mammifères, les oiseaux, les reptiles, les amphibiens et les plantes vasculaires.	Variation annuelle de la superficie des zones humides dues à la consommation d'eau dans la zone humide ou son bassin versant. Perte potentielle en espèces de taxon par mètre carré de zone humide perdue.	Grille mondiale de 0.05° x 0.05°	Agrégation par pays basée sur la consommation d'eau (Verones et al., 2017).

8.3 Fichier de données

CIRAIG_SCORELCA_CaseStudy_Shampoo_LCI.xlsx.

8.4 Création d'une catégorie d'ÉICV à partir de données géospatiales dans openLCA

La Figure 102 montre la configuration de ces catégories avec des FC régionalisés pour la méthode AWARE, qui a été intégrée à partir de la carte à l'échelle native fournie par les auteurs. Une fois une catégorie d'impact ouverte ou créée, l'onglet *regionalized calculation* contient toutes les informations pour l'agrégation de FC régionalisés. Dans la section setup, il faut télécharger l'archive au format *geoJSON* avec les FC à l'échelle native (ou autre si l'échelle native n'est pas disponible). Une fois téléchargée, cette archive contient les valeurs des différents paramètres qui apparaîtront dans la section *geoJSON parameters* avec leur valeur par défaut et la gamme de valeurs.

Dans la section *Flow binding* il faut sélectionner les flux élémentaires qui vont être caractérisés. Dans l'exemple, tous les flux d'eau sont inclus. La valeur assignée pour ces flux (formula) utilise les paramètres. Une fois la méthode définie, il est conseillé de la sauvegarder afin de garder cette configuration; car l'enregistrement de l'indicateur ne garde pas les informations de l'onglet *regionalized calculation*.

AWARE regionalised ×

Regionalized calculation - AWARE regionalised

Setup

GeoJSON or setup file

Open Save Validat

GeoJSON Parameters

Parameter	Identifier	Default value	Range	Aggregation type
YR_IRRI	✖ yr_irri	22.81625111016...	[0.0, 100.0]	Weighted average
YR_NONIRRI	✖ yr_nonirri	20.73200431707...	[0.0, 100.0]	Weighted average
YR_TOT	✖ yr_tot	22.60718868922...	[0.0, 100.00000000...	Weighted average

Flow bindings

Flow	Category	Formula	Default value	Unit
Water, cooling, unspecified nat...	Elementary flows...	yr_tot	22.6071886892278...	m3
Water, lake	Elementary flows...	yr_tot	22.6071886892278...	m3
Water, process, unspecified nat...	Elementary flows...	yr_tot	22.6071886892278...	m3
Water, river	Elementary flows...	yr_tot	22.6071886892278...	m3
Water, turbine use, unspecified...	Elementary flows...	yr_tot	22.6071886892278...	m3

General information | Characterization factors | Parameters | **Regionalized calculation** | Similarities

Figure 102 : Exemple d'indicateur avec FC régionalisés avec l'approche géospatiale dans openLCA.

Une fois la configuration enregistrée, il faut calculer des FC régionalisés agrégés. Cette étape de pré-calcul des FC permet d'alléger les calculs de résultats d'impact spatialisés.

Pour cela, il faut sélectionner les géographies pour lesquels les FC vont être calculés en haut à droite de la section *flow bindings*. Les géographies peuvent être toutes celles contenues dans le dossier *locations* et peuvent inclure des nouvelles ou des géographies créées ad-hoc pour un projet. L'approche de calcul est similaire à celui expliqué dans la section 2.3.3 lors de la définition des FC à échelle agrégée. Une fois les FC calculés, il faut les ajouter à la catégorie d'impact et enregistrer cette dernière. Les FC

calculés apparaîtront dans l'onglet *Characterisation factors*. La Figure 103 montre un exemple de FC régionalisés pour la catégorie *Water stress* de la méthode LC-IMPACT. Il est à noter la différence avec les méthodes spatialisées avec les flux contenant le nom; dans ce cas-ci, l'information sur la géographie est incluse dans une colonne séparée.

Welcome Water stress - human health (average approach) X

Characterization factors - Water stress - human health (average approach)

Characterization factors

Flow	Category	Factor	Unit	Uncertainty	Location
Water	Elementary flows/Emission to w...	4.3605E-6	DALY/m3	none	PK
Water	Elementary flows/Emission to w...	8.320755309E-7	DALY/m3	none	LK
Water	Elementary flows/Emission to w...	1.374014504E-7	DALY/m3	none	TD
Water	Elementary flows/Emission to w...	3.8886998E-9	DALY/m3	none	HU
Water	Elementary flows/Emission to w...	2.17714134E-7	DALY/m3	none	KZ
Water	Elementary flows/Emission to w...	2.92114E-8	DALY/m3	none	CO
Water	Elementary flows/Emission to w...	5.520528705E-7	DALY/m3	none	NE
Water	Elementary flows/Emission to w...	3.53502E-9	DALY/kg	none	EG
Water	Elementary flows/Emission to w...	6.679753E-10	DALY/m3	none	EE
Water	Elementary flows/Emission to w...	9.42062E-10	DALY/kg	none	LY
Water	Elementary flows/Emission to w...	1.8905430169E-6	DALY/m3	none	BD
Water	Elementary flows/Emission to w...	4.291580996E-7	DALY/m3	none	MZ
Water	Elementary flows/Emission to w...	2.27194E-6	DALY/m3	none	SW
Water	Elementary flows/Emission to w...	3.07782E-10	DALY/kg	none	CL
Water	Elementary flows/Emission to w...	1.091050047E-7	DALY/m3	none	DD
Water	Elementary flows/Emission to w...	1.11265000000000...	DALY/kg	none	LT
Water	Elementary flows/Emission to w...	5.5205287049999...	DALY/kg	none	NE
Water	Elementary flows/Emission to w...	4.418241E-10	DALY/m3	none	DE
Water	Elementary flows/Emission to w...	1.751379102E-10	DALY/kg	none	EC
Water	Elementary flows/Emission to w...	7.754943664E-10	DALY/kg	none	SO
Water	Elementary flows/Emission to w...	8.320755309E-10	DALY/kg	none	LK
Water	Elementary flows/Emission to w...	1.94874435E-8	DALY/m3	none	GY
Water	Elementary flows/Emission to w...	4.21908E-7	DALY/m3	none	PS

General information | Characterization factors | Parameters | Regionalized calculation | Similarities

Figure 103 : FC régionalisés calculés avec l'approche géospatiale dans openLCA.

Il a été remarqué pour la méthode LC-IMPACT que parfois l'intégration des valeurs pour les nouvelles géographies se fait de façon erronée. En effet, bien que le calcul mène à des FC différents pour toutes les régions, lors de l'intégration dans la méthode des nouveaux FC calculés, seule la valeur moyenne est utilisée dans ces nouvelles géographies.

Il faut aussi noter que l'agrégation des valeurs des FC à l'échelle de résolution native pour calculer des nouveaux FC agrégée à une échelle de résolution différente ne respecte pas l'approche préconisée par les développeurs de méthodes d'ÉICV. L'agrégation des FC régionalisés natifs se fait en utilisant comme facteur de pondération la surface des cellules au lieu des facteurs de pondération recommandés par les développeurs des méthodes d'ÉICV (par exemple la quantité d'eau consommée dans chacune des cellules natives dans le cas de la méthode AWARE). Dans le cas d'AWARE, la pondération devrait être faite différente car la quantité d'eau consommée dans chaque bassin versant n'est pas proportionnelle à la surface du bassin versant. Les résultats obtenus par cette approche sont donc faux.

Finalement, il est important de tenir compte du fait que cette version des méthodes d'impact avec approche géospatiale n'est pas, en principe, compatible avec un inventaire spatialisé avec la géographie dans le nom du flux. En effet, les FC inclus dans la méthode n'incluent pas la géographie dans leur nom et l'utilisation avec un inventaire spatialisé de cette façon donnerait un résultat sous-estime dû aux nombreux flux non-caractérisés. Il serait possible de combiner les deux approches dans la même version de la base de données seulement si tous les flux spatialisés avec la géographie dans le nom du flux étaient aussi inclus dans la liste de la section *Flow binding* et que le calcul ultérieur était fait pour toutes les combinaisons de flux et géographies. Cette solution ralentirait beaucoup le calcul de FC régionalisés.

8.5 Brightway

Cette section apporte des compléments à la section 5.7, dédiée à la modélisation du système avec Brightway. Elle couvre plus spécifiquement les étapes d'installation, l'importation de la méthode IMPACT World+ et l'utilisation de bibliothèques supplémentaires telles que Regioinvent et Polyviz. Bien que cette présentation reste volontairement concise, afin de maintenir la portée de cette étude, des liens utiles sont proposés pour permettre au lecteur d'explorer davantage les sujets de son intérêt.

8.5.1 Installation

- **Installation de Brightway de manière indépendante** : Vous pouvez installer Brightway séparément de l'*Activity Browser* en suivant les instructions disponibles ici :
 - <https://docs.brightway.dev/en/latest/content/installation/index.html>
- **Installation de Brightway via l'*Activity Browser*** : Alternativement, vous pouvez installer à la fois Brightway et l'*Activity Browser* en suivant les instructions fournies ici :
 - <https://github.com/LCA-ActivityBrowser/activity-browser?tab=readme-ov-file#installation>
- **Choix d'installation pour ce projet** : Pour cette étude de cas, la deuxième option a été retenue, en utilisant particulièrement Miniconda, comme décrit dans la section *Installation – The quick way* du lien ci-dessus.
- **Exigence de licence** : Comme pour d'autres logiciels d'ACV (SimaPro, openLCA), l'utilisation de Brightway nécessite une licence ecoinvent.

Une fois Brightway et l'*Activity Browser* installés, il est nécessaire de créer un projet pour effectuer des modélisations d'ACV. Un projet sert de conteneur pour les bases de données et les méthodes d'ÉICV. Lors de la création du projet, il est impératif d'importer d'abord la base de données des flux élémentaires, appelée biosphere3. Cette étape permet également l'installation des méthodes d'impact telles que EF 3.1, IPCC 2021, ReCiPe 2016, etc.

8.5.2 Importation de la méthode IMPACT World+

Pour installer la méthode d'ÉICV IMPACT World+ (Bulle et al., 2019), il est nécessaire de récupérer le fichier *bw2package* depuis un répertoire Zenodo (Agez et al., 2023). Ensuite, il faut accéder directement à Brightway et utiliser la fonction `BW2Package.import_file()` pour importer IMPACT World+ dans le projet ciblé. La Figure 104 illustre le processus d'importation de la méthode IMPACT World+ dans un projet nommé `general_e39`.

```

1 # Import Brightway2
2 from brightway2 import *
3 # Set the name of the project
4 project_name = "general_e39"
5 # Set the path to IW+
6 fp_iwp = "./impact_world_plus_201_brightway2_expert_version.
7 e2a8415edfe998674fba2e09bddfd831.bw2package"
8 # Activate the project
9 projects.set_current(name = project_name)
10 # Import the database
11 BW2Package.import_file(filepath = fp_iwp)

```

Figure 104. Importation de la méthode d'ÉICV IMPACT World+ version 2.0.1 dans Brightway

8.5.3 Importation de projets

- **Problèmes d'importation** : Au moment de la rédaction de ce rapport, l'importation d'un fichier CSV généré par SimaPro avec ecoinvent 3.9.1 dans Brightway rencontre des problèmes de mise en correspondance (mapping).
- **Vérification des mises en correspondance** : Les praticiens ACV sont invités à vérifier la disponibilité de correspondances compatibles pour la version d'ecoinvent utilisée.
- **Ressources supplémentaires** : Pour des informations sur l'importation d'un projet SimaPro dans Brightway, consultez le site suivant :
 - <https://docs.brightway.dev/en/latest/content/theory/io.html#importing-from-simapro>

8.5.3.1 Importation d'un modèle ACV dans un projet Brightway avec flux élémentaires spatialisés

- **Optimisation du temps** : L'importation du modèle ACV permet une réduction significative du temps nécessaire en évitant la recréation complète du modèle. La connexion avec les bases de données contenant des flux élémentaires spatialisés facilite une intégration plus rapide et efficace, optimisant ainsi les processus de modélisation.
- **Spatialisation manuelle des flux élémentaires** : Malgré les avantages de l'importation, une spatialisation manuelle des flux élémentaires présents dans l'avant-plan du modèle est nécessaire. Cette opération garantit une précision accrue dans la représentation spatiale de l'ensemble des flux élémentaires.

8.5.4 Création de la base de données Regioinvent

- **Obtenir une licence ecoinvent** : Assurez-vous de posséder une licence valide pour ecoinvent.
- **Télécharger la base de données UN COMTRADE** : Téléchargez la version de la base de données UN COMTRADE qui a été préalablement extraite et traitée. Vous pouvez la récupérer à l'endroit suivant :
 - <https://zenodo.org/records/13146833>

- **Installer Brightway2:** Installez Brightway2 et configurez un projet Brightway2 en utilisant la version *cut-off* d'ecoinvent 3.9.1 (Agez, 2024).
- **Vérification de la compatibilité :** Notez que Regioinvent est compatible uniquement avec la version *cut-off* d'ecoinvent 3.9.1 et fonctionne exclusivement avec Brightway2 (et non Brightway2.5).
- **Suivre les instructions présentées dans le répertoire GitHub dédié :** Référez-vous au notebook Jupyter `demo.ipynb` pour suivre les étapes nécessaires à la configuration (Agez, 2024):
 - <https://github.com/CIRAIG/Regioinvent?tab=readme-ov-file#get-started>

8.5.5 Calcul d'ACV régionalisée par spatialisation des flux élémentaires dans Brightway

- Il est impératif d'utiliser une méthode d'ÉICV régionalisée lorsque les flux élémentaires sont spatialisés afin de garantir l'exactitude des résultats.
- 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.

8.5.6 Utilisation de Bibliothèques Complémentaires à Brightway

- **Description de Polyviz :** La bibliothèque Python Polyviz établit un lien entre Brightway et la bibliothèque JavaScript D3, permettant la génération de diverses visualisations des résultats, telles que les diagrammes de Sankey, les diagrammes de cordes, les graphes à force dirigée, les *treemaps*, les cartes choroplèthes et les graphiques en violon (Sacchi, 2023).
- **Installation :** Les instructions pour l'installation de la bibliothèque Polyviz sont disponibles sur le site GitHub dédié :
 - <https://github.com/romainsacchi/polyviz>