

INTERET ET MISE EN ŒUVRE D'UN COUPLAGE ENTRE ACV ET SIG

SYNTHESE

Décembre 2015

Responsable scientifique :

- Ellori Igos, Alessio Mastrucci, Enrico Benetto

Environmental Research and Innovation Department
5, avenue des Hauts-Fourneaux
L-4362 Esch/Alzette
Téléphone : +352 275 888 1
www.list.lu

LUXEMBOURG
INSTITUTE
OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY



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.

- ✓ 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.

Introduction

Les experts en Analyse du Cycle de Vie (ACV) se sont tournés vers une régionalisation des impacts dans les années 2000, qui s'est intensifiée ces dernières années grâce à l'utilisation de Systèmes d'Information Géographique (SIG). Cependant, les études couplant le SIG avec l'ACV restent encore dans le domaine de la recherche. Cette étude a pour but de dresser un état de l'art, définir la faisabilité et proposer des recommandations pour l'implémentation d'un couplage entre ACV et SIG. Les conclusions vis-à-vis de l'intérêt du couplage selon le contexte de l'étude et sa mise en œuvre sont résumées et discutées ici.

Intérêt et contexte d'application du SIG pour l'ACV

➤ *Etat de l'art*

Dans la littérature, le SIG a été utilisé à la fois pour affiner la représentativité géographique de l'inventaire du cycle de vie et les méthodes d'évaluation des impacts.

Les études ACV prenant en compte des données SIG pour l'inventaire du cycle de vie datent d'après 2010. Une des principales applications du SIG observées est pour supporter une stratégie territoriale. Dans ce cas, l'unité fonctionnelle prend en compte les activités d'une ville (p.ex. la ville de Sheffield dans Azapagic et al, 2013), d'une région (p.ex. le Bassin de Thau dans Loiseau et al, 2014) ou même d'un pays (p.ex. les Etats-Unis dans Geyer et al, 2013). Cela permet de collecter un grand nombre de données disponibles pour le territoire étudié (via des bases de données ou fournies par des autorités compétentes) et de visualiser les résultats sous forme de cartes.

Les principaux secteurs des études revus effectuant un couplage ACV-SIG sont l'agriculture, les transports et logistique, les infrastructures et l'énergie. En effet, ces secteurs sont sensibles à des paramètres avec une variabilité géographique significative. Pour l'agriculture, des couches de types de forêts ou cultures d'un territoire, de données agronomiques (orientation du terrain, type de sol, etc.) ou climatologiques (p.ex. précipitations, températures) peuvent alimenter l'inventaire (p.ex. Ooba et al, 2015 ; Gasol et al, 2011). Dans le cadre des transports, le calcul de distances à partir de couches SIG de réseaux de transports peut faciliter la collecte de données et la simulation de scénarios logistiques (p.ex. Newell et al, 2011 ; Nahlik et al, 2015). Les cartes de bâtiments ou de stock de matériaux peuvent être utilisées pour générer les résultats d'impacts dans le secteur des infrastructures (Nichols & Kockelman, 2014 ; Eufasio Espinosa & Stevenson, 2013). Enfin, concernant l'énergie, le SIG a été utilisé pour la production d'énergie à partir de biomasse (données liées au secteur agricole), pour la modélisation du réseau (calcul de distances) ou pour résoudre des problèmes d'optimisation spatiale de fourniture d'énergie (Delivand et al, 2015 ; Saner et al, 2014).

La spatialisation de la caractérisation des impacts peut s'avérer importante pour des catégories sensibles à la variabilité spatiale. Le SIG a notamment permis de modéliser le potentiel d'acidification qui dépend de modèles de déposition et de la sensibilité du sol (Huijbregts et al, 2001 ; Roy et al, 2014). Le potentiel d'eutrophisation dépend de paramètres spécifiques à la géographie tels que le flux des cours d'eau ou le cycle des sédiments (Huijbregts et al, 2001 ; Helmes et al, 2012). Récemment, des efforts ont été entrepris pour spatialiser les impacts toxiques (Sala et al, 2011 ; Kounina et al, 2014). En effet, les facteurs de caractérisation dépendent du milieu extérieur (p.ex. taux de précipitation, géométrie des compartiments environnementaux, densité de population) influençant le comportement de la substance polluante et l'exposition à celle-ci. Les applications du SIG pour l'évaluation des impacts de l'utilisation des terres sont nombreuses dans la littérature (de Baan et al, 2013 ; Cao et al, 2015 ; Núñez et al, 2013). Cela est dû à la sensibilité de ces méthodes à des données locales, comme les caractéristiques du sol (type d'utilisation, contenu carbone, etc.). La caractérisation de

l'extraction des ressources en eau fait également l'objet de nombreuses publications (Pfister et al, 2009 ; Boulay et al, 2011 ; Van Zelm et al, 2011) qui utilisent des données SIG telles que le taux de précipitation et les données hydrologiques. Cucurachi & Heijungs (2014) ont quant à eux étudié l'aspect local des impacts dus au bruit, très sensibles à la géographie (p.ex. éléments topographiques, densité de population). Enfin, la méthode IMPACT World+TM, en cours de développement, a pour but de régionaliser la caractérisation des impacts liés aux effets respiratoires, à la toxicité humaine et écotoxicité, à l'acidification, à l'eutrophisation, aux radiations ionisantes, à l'utilisation de l'eau et à l'utilisation des terres.

➤ *Cas d'étude*

Les deux cas d'étude ont été choisis par rapport à la pertinence du SIG pour le secteur et les catégories d'impact considérés.

Le premier cas d'étude concerne le cycle de vie de l'essence utilisé comme carburant de voiture, comprenant les étapes de production, transport, raffinement, stockage et combustion. Pour la modélisation de l'inventaire, il est donc intéressant d'utiliser le SIG pour calculer les distances entre les différents sites du cycle de vie, suivre le trajet de la voiture et adapter les émissions de celle-ci selon le type de route et la température. Les impacts liés au stress hydrique et à la toxicité sont également régionalisés.

L'objectif du second cas d'étude est d'évaluer l'impact environnemental des bâtiments résidentiels à l'échelle de la ville de Rotterdam (Pays Bas) et son potentiel de réduction grâce aux mesures de rénovation des bâtiments. Ici, la pertinence d'un couplage SIG-ACV est grande du fait de l'aspect territorial de l'étude. De plus, les autorités de la ville ont mis à disposition de nombreuses données utiles pour la modélisation de l'inventaire (p.ex. élévation, empreintes de bâtiments, adresses).

➤ *Recommandations*

Le degré de pertinence d'un couplage ACV-SIG a été évalué selon les objectifs et champ de l'étude, en particulier le type d'application visé, le contexte de décision, l'audience visée, le secteur du système étudié, l'unité fonctionnelle, les critères de qualité des données et les impacts environnementaux considérés.

Pour le type d'application, l'utilisation la plus pertinente est pour un support de développement stratégique de politique (contexte de décision de type B). En effet, la grande portée et échelle des résultats nécessite une représentativité de qualité élevée et parfois une résolution géographique des résultats. Dans le cas d'une optimisation, le couplage ACV-SIG est essentiel pour faire interagir les deux outils. Le couplage SIG et ACV peut également être pertinent pour une aide à la décision, même à plus petit échelle, p.ex. écoconception, comparaison de produits (contexte de décision de type A). Dans ce cas, le SIG peut éviter de biaiser les conclusions à cause d'une mauvaise représentativité géographique (Mutel et al, 2012). L'intérêt d'un couplage peut aussi s'avérer élevé pour dresser un rapport des impacts à grande échelle (bilans pour un pays, une catégorie de produit, etc.) ou pour le développement de modèle (base de données d'inventaire ou calcul d'impacts environnementaux). Enfin, l'intérêt est plus faible pour une application de l'ACV simple d'un point de vue méthodologique (p.ex. rapport de performances, déclaration environnementale).

Concernant l'audience, il n'y a pas un lien direct avec l'utilisation du SIG. Cependant, la visualisation des résultats par carte peut avoir une plus grande utilité lorsque l'audience visée concerne un public large, non spécialisé en ACV (plus facilement compréhensible et plus grand impact).

Comme observé dans l'état de l'art, l'utilisation du SIG pour les données d'inventaire est pertinente pour les ACVs territoriales, mais aussi pour des secteurs à forte sensibilité géographique, tels que

l'agriculture, les transports et logistiques, les infrastructures et l'énergie. En effet, le SIG peut faciliter la collecte (p.ex. carte des bâtiments d'une ville, localisation des sites de production, types de sols) et permettre de calculer des données d'inventaire (p.ex. distances, surface de plancher, etc.).

La définition de l'unité fonctionnelle (UF) peut comprendre des spécificités géographiques (p.ex. la fourniture d'énergie d'une municipalité, la livraison de papier à Los Angeles) qui augmentent l'intérêt du SIG pour visualiser les résultats pour le contexte géographique de l'UF.

Après avoir identifié les frontières du système et donc les différents flux, l'ACViste doit spécifier les critères de qualité de données, nécessitant parfois une certaine résolution géographique (p.ex. par bâtiment, par champ de culture). Dans ce cas, un couplage ACV-SIG est nécessaire. La pertinence du couplage est aussi élevée pour des données spécifiques sensibles à la variabilité géographique (p.ex. densité de population, température, distance de transports).

Enfin, pour le choix des impacts considérés, la toxicité (humaine et écotoxicité) et l'impact du bruit sont très sensibles à la variabilité géographique. D'autres catégories ont également un aspect régional accentué : eutrophisation, acidification, pollution particulaire, radiation ionisante, création d'ozone photochimique et utilisation des ressources naturelles (terres et eau). Les impacts sur le changement climatique, l'épuisement d'ozone ou de ressources fossiles et minérales ont quant à eux une portée plus globale et ne nécessitent pas un affinement géographique. Lorsque l'on agrège les impacts aux points finaux, les effets sur la santé humaine et sur les écosystèmes dépendent de paramètres régionaux. Le niveau de résolution des facteurs de caractérisation est encore un sujet de débat dans la communauté ACV (voir paragraphe 1.2.4). Pour l'instant, nous recommandons l'utilisation du SIG seulement à partir du caractère régional de la catégorie considérée.

Le degré de pertinence d'un couplage ACV-SIG selon les objectifs et champ de l'étude est évalué dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Intérêt du couplage ACV-SIG en fonction des objectifs et champ de l'étude

Intérêt couplage SIG	Faible Elevé		
Application visée	Indicateurs de performances, critère écolabel, déclaration environnementale	Ecoconception, comparaison, amélioration fournisseurs, informations de politiques, développement de modèle	Développement de politique, optimisation
Contexte de décision selon l'ILCD	C	A	B
Audience visée	Autres		Externe, non technique
Secteur visé	Autres	Agriculture, transports, infrastructures, énergie	ACV territoriale
Définition de l'UF	Sans spécification géographique		Avec spécification géographique
Critères qualité données	Autres	Données spécifiques, sensibles à la variabilité géographique	Données avec résolution spatiale
Impacts environnementaux	Changement climatique, épuisement d'ozone, ressources minérales et fossiles	Eutrophisation, acidification, particules, radiation ionisante, ozone photoch., utilisation d'eau, des terres	Toxicité, bruit

Mise en œuvre du couplage ACV-SIG

➤ *Etat de l'art*

Le *couplage* indique en informatique le niveau d'interaction entre les différents composants de logiciels en termes d'échange d'informations. Selon Pressman (1992), sept différents niveaux de couplage existent, de l'*absence de couplage* (les logiciels n'échangent aucune information), en passant par les *couplages faibles* (une quantité limitée d'information est échangée) jusqu'aux *couplages forts* (les outils interagissent en échangeant une grande quantité d'informations). Dans la littérature ACV, plusieurs auteurs ont utilisé différents degrés d'interaction entre les outils, néanmoins, en abordant rarement les détails du couplage.

Le niveau le plus simple consiste à utiliser des données spatialisées d'inventaire en input, les stocker dans des bases de données spatialisées appropriées et visualiser les données et résultats sous forme de carte (Ooba et al., 2015 ; Geyer et al., 2013). Un niveau plus avancé prévoit l'emploi du SIG pour le traitement automatisé de données spatialisées afin de générer de nouvelles données d'inventaire (Dresen and Jandewerth, 2012 ; Newell et al., 2011). Certaines études appliquent un couplage faible entre les différents outils. Dans ce cas-là, les résultats du traitement des données par le SIG sont utilisés en entrée pour l'inventaire sans une automatisation complète des interactions. Certains auteurs ont automatisé l'entrée de données SIG vers des outils ACV jusqu'à un couplage fort où les différents outils communiquent entre eux avec un feedback. L'une des applications les plus avancées du SIG en ACV consiste en la résolution de problèmes d'optimisation spatiale (Delivand et al., 2015 ; Saner et al., 2014).

Pour ce qui concerne la génération de facteurs de caractérisation (FCs) spatialisés, certains travaux se sont contentés d'utiliser certaines données ou modèles SIG pour différencier des FCs par région ou archétype (résultats présentés sous forme de tableaux). Ici, le praticien peut adapter la méthode d'évaluation des impacts dans un logiciel ACV (modification des valeurs de FCs) selon le contexte géographique du système étudié pour les calculs ACV. D'autres auteurs ont opté pour une approche plus avancée en proposant des FCs géoréférencés (pouvant être visualisés dans un logiciel SIG). Cette dernière approche permet une résolution plus fine et le couplage avec des données d'inventaire également géoréférencées (via des traitements de données SIG tels que l'intersection de couches).

Enfin, les études intégrant des modèles SIG pour l'inventaire et pour la caractérisation des impacts sont rares dans la littérature ACV. En effet, certaines études spatialisent l'inventaire mais calculent ensuite un impact global qui n'a pas besoin d'être spatialisé, tel le potentiel de changement climatique. De plus, les articles ayant développé des facteurs de caractérisation géoréférencés sont relativement récents (surtout depuis les quatre dernières années). Certaines publications ont cependant effectué cet exercice, notamment pour le secteur de l'agriculture (Pfister et al, 2011 ; Rodriguez et al, 2014).

Pour finir, nous avons étudié les possibilités offertes par les logiciels et les bases de données pour un couplage avec les SIG. Les logiciels ACV ne possèdent pas encore de fonction de traitement de données SIG, à part OpenLCA et Brightway2. Ces derniers sont libres, le code source peut donc être modifié pour, par exemple, ajouter des fonctionnalités liées à la spatialisation de l'ACV. OpenLCA permet d'ajouter des coordonnées géographiques à un procédé et de visualiser la contribution de chaque région au score finale sur une carte. Brightway2 possède un plugin pour spatialiser l'inventaire et les facteurs de caractérisation, et pour exporter les cartes de contribution. Parmi les bases de données utilisées en ACV, seule ecoinvent 3, via le format ecospold2, permet le stockage des coordonnées géographiques associées à des activités, exploitables par un SIG¹. Néanmoins, cette fonction est pour le moment peu utilisée. Les formats ecospold1 et ILCD permettent seulement de stocker le

¹ <http://geography.ecoinvent.org/>

code ISO de la région ou du pays où se produit l'activité (avec une seule région possible). Enfin, les fichiers propriétaires utilisés par GaBi ou Simapro ne permettent pas non plus de stocker des informations géographiques plus détaillées.

➤ *Cas d'étude*

Les deux cas d'étude réalisés permettent de comprendre les aspects et limitations pratique d'un couplage faible et d'un couplage fort.

Pour le premier cas d'étude, un couplage fort a été réalisé entre QGIS et Brightway2 (les deux pouvant utiliser des scripts Python et open source). Un plug-in en QGIS a été développé avec les fonctionnalités suivantes : traiter automatiquement les données SIG, choisir les données d'input et les méthodes d'évaluation des impacts, lancer les calculs dans Brightway2 et visualiser les résultats sur carte. Pour ce cas d'étude, le SIG a permis de : augmenter la disponibilité des données grâce aux fichiers SIG disponibles dans le domaine public ; générer des nouvelles données d'inventaire grâce aux fonctions de traitement SIG (superposition de couches, calcul de distance, différenciation de flux selon localisation) ; générer ou utiliser des facteurs de caractérisation régionalisés ; affiner le calcul d'impacts pour les procédés de premier plan (superposition des données d'inventaire et des facteurs de caractérisation régionalisés) ; visualiser les résultats sous forme de carte. Les contraintes identifiées par le couplage SIG et ACV sont : la difficulté de localisation d'impacts sur un trajet ; la caractérisation des impacts des procédés d'arrière-plan ; l'effort de programmation pour automatiser l'échange entre outils SIG et ACV ; les connaissances requises en SIG, notamment pour des opérations de traitement de données (p.ex. création de zones tampons, calcul de distances, etc.).

Un couplage de type faible a été mis en œuvre pour le deuxième cas d'étude grâce à un connecteur du logiciel libre R liant les logiciels libres GRASS-GIS et QGIS avec SimaPro 7.3.3. Le logiciel R a été choisi pour la possibilité d'importer, traiter et exporter des données spatialisées. L'inventaire de premier plan est spatialisé grâce au traitement automatisé de données SIG, tandis que les impacts des éléments des référence des bâtiments (incluant leur rénovation et fin de vie) sont calculés par unité dimensionnelle (p. ex. le mètre-carré pour la superficie de l'enveloppe). Le couplage permet d'associer les impacts aux données SIG des bâtiments et d'agrèger les résultats à l'échelle d'une ville. Pour cette étude le SIG a permis de : tester différentes procédures pour générer des nouvelles données d'inventaire à partir de données SIG ; localiser les sources d'impact ; visualiser les résultats sous forme de cartes. Les contraintes identifiées par le couplage SIG et ACV sont la disponibilité de données précises et complètes à la large échelle, la validation des résultats de l'analyse SIG, les connaissances requises en SIG pour des opérations de gestion, traitement de données et visualisation.

➤ *Recommandations*

Les types de couplage possibles entre ACV et SIG ont été passés en revue en détaillant les techniques ainsi que les compétences, le temps et la charge de travail requises pour leur mise en œuvre (Tableau 2). Trois types de couplage ont été distingués. Une absence de couplage consiste à ajouter manuellement des données SIG dans la modélisation de l'ACV. Cela peut être pratique lorsque les compétences SIG et informatiques sont faibles. Cependant, cette méthode n'est applicable que lorsque la quantité de données à traiter est faible, et elle limite la répliquabilité des résultats. Un couplage faible permet d'automatiser certains échanges entre les deux outils, notamment via un connecteur, pour traiter un plus grand nombre de données. Selon la complexité, la charge de travail et les compétences requises varient. Si les compétences informatiques sont avancées, un couplage fort est possible pour automatiser complètement l'interaction entre le SIG et l'ACV et contrôler ces deux outils via la même interface (dans un logiciel ACV ou un connecteur).

Tableau 2 : Compétences, charge de travail et quantité de données SIG en fonction des types de couplage SIG – ACV

Type de couplage	Description	Compétence requises en SIG	Compétences requises en informatique	Charge/ temps de travail	Quantité données SIG
Absence de couplage	Pas d'interaction entre les outils ACV et SIG. Ajout manuel de données SIG.	Basiques (-)	Basiques (-)	Faible (-)	Peu (-)
Couplage faible	Semi-automatisation des échanges avec prétraitement dans chacun des logiciels.	Basiques à avancées (-/++)	Basiques à moyennes (-/+)	Faible à moyen (-/+)	Moyen (+)
Couplage fort	Automatisation complète des échanges avec le contrôle de toutes les données dans le logiciel ACV ou dans un connecteur.		Moyennes à avancées (+/++)	Moyen (+)	Moyen à beaucoup (+/++)

Afin de fournir des recommandations pratiques, un arbre de décision a été élaboré (Figure 1). Il détermine le type de couplage à suivre selon les objectifs et champ de l'étude mais aussi en fonction des compétences de l'équipe ACV. Tout d'abord, on teste si l'ACV est utilisée comme support à la décision, ce qui augmente la pertinence du couplage, surtout pour une stratégie territoriale ou industrielle avec une résolution géographique des résultats. Un couplage fort est nécessaire dans le cadre d'une optimisation spatiale. Pour ces types d'études, il est obligatoire d'avoir un minimum de compétences en SIG. Le choix du couplage faible ou fort est guidé par les compétences informatiques de l'équipe. Si l'étude concerne un bilan à grande échelle ou une aide à la décision pour un secteur sensible à la géographie (transports, énergie, agriculture, etc.), des données d'inventaire spatialisées peuvent être utilisées même si une résolution n'est pas nécessaire. Le couplage recommandé dépend alors du nombre de données à traiter, du temps disponible et des compétences de l'équipe ACV. Enfin, dans le cas d'un inventaire peu sensible à la géographie, le couplage présente peu d'intérêt. Seulement si des impacts régionaux sont pris en compte, les facteurs de caractérisation correspondants peuvent être implémentés dans un logiciel ACV sous forme de tableau (absence de couplage).

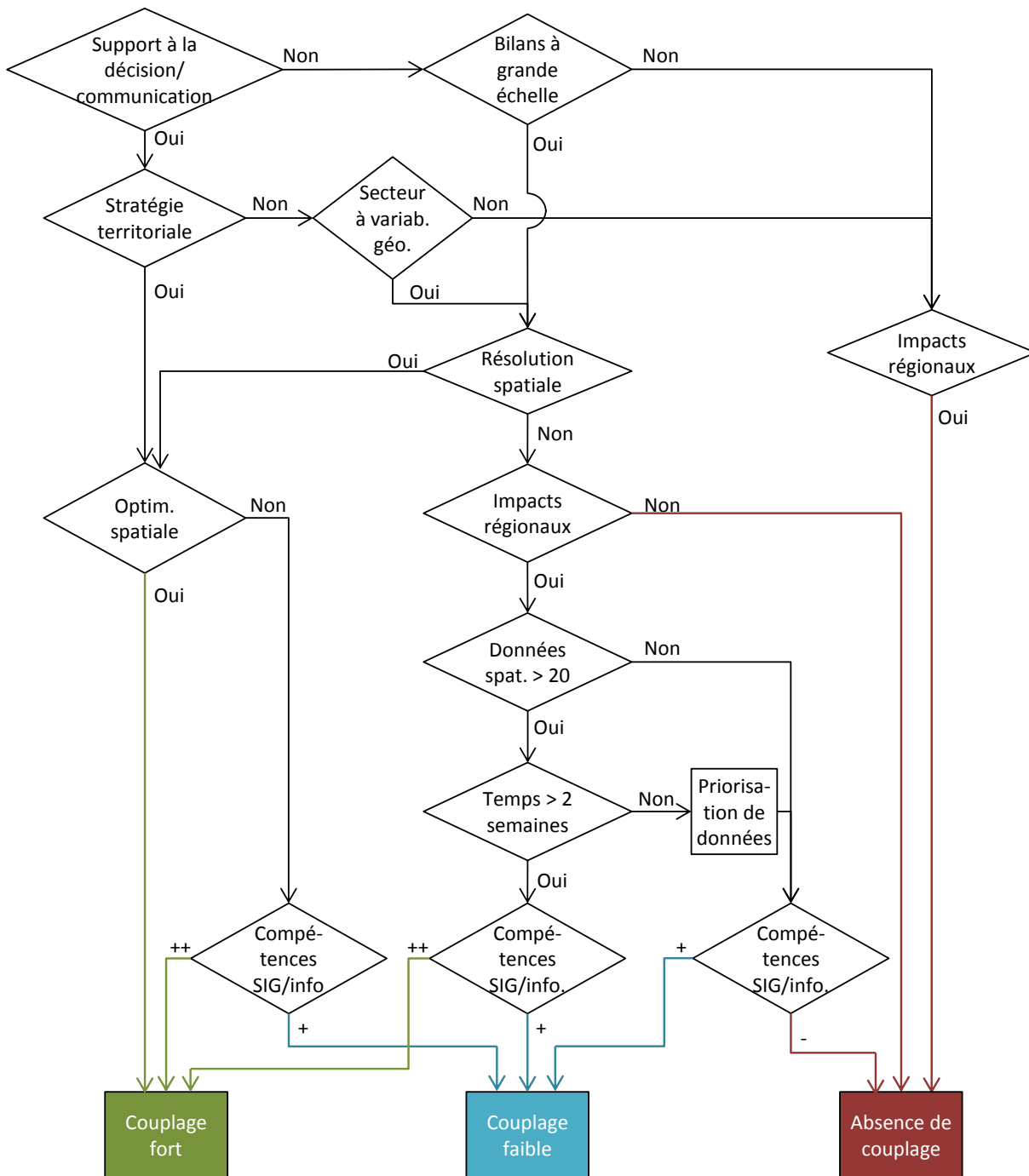


Figure 1 : Arbre de décision pour le choix du type de couplage ACV-SIG

Discussion

Cette section décrit les barrières d'implémentation, les précautions d'utilisation et les développements futurs liés au couplage SIG-ACV.

Même si l'utilisation du SIG semble nécessaire pour l'étude ACV, le praticien peut être confronté à plusieurs barrières pour mettre en place ce couplage.

Tout d'abord, les données d'inventaire ou d'évaluation d'impacts à spatialiser ne sont pas toujours disponibles. Concernant les procédés d'arrière-plan, même si ecoinvent v3 associe des identifiants

SIG aux procédés, beaucoup d'entre eux restent avec une dénomination « Rest of the World (RoW) » qui diffère selon les activités considérées. Pour compenser un manque de données, il est possible de générer des nouvelles données spatialisées à partir de données existantes (p.ex. hauteur des bâtiments à partir de l'empreinte et des données d'élévation). Un traitement peut également être nécessaire pour harmoniser les différentes échelles des couches SIG. Toutes ces étapes de calcul requièrent des compétences SIG qui sont encore peu répandues dans la communauté ACV. En plus des compétences SIG, un couplage demande des compétences plus ou moins basiques en informatique du fait que les logiciels ACV communs manquent de fonctionnalités de traitement de données SIG. Certains couplages seraient faciles à mettre en place (p.ex. via un tableur Excel) mais le fait de sortir d'un usage conventionnel des logiciels ACV peut freiner le praticien à effectuer ce type d'opération. Enfin, selon la complexité et la quantité de données à traiter, la charge de travail additionnelle que représente un couplage ne facilite pas son utilisation, en particulier dans les entreprises privées. Un couplage peut aussi se traduire en budget additionnel si les compétences requises ne sont pas présentes dans l'équipe.

Certaines précautions d'utilisation ont été soulevées par des auteurs. Par exemple, lorsque le praticien choisit d'utiliser une résolution fine (p.ex. 10 km x 10 km), la précision augmente mais l'exactitude peut diminuer. En effet, comme souligné par Mutel et al (2012), les méthodes d'évaluation des impacts comportent de nombreuses incertitudes liées à la modélisation de la chaîne de cause à effet. La multiplication du nombre de facteurs engendre une variabilité additionnelle qui peut s'avérer injustifiée selon l'échelle choisie. Le praticien doit alors être prudent sur la validité de la résolution spatiale. Au niveau de l'interprétation, Heijungs (2012) met également en garde sur le fait qu'un produit B puisse avoir plus d'émissions qu'un produit A mais du fait de sa position géographique (p.ex. dans l'océan), les impacts sont plus faibles. Ce problème peut être résolu en comparant les résultats avec et sans régionalisation. L'auteur souligne également une possible mauvaise utilisation du SIG et une inadéquation des résolutions entre inventaire et méthodes d'impact induites par le manque de précision des bases de données ACV. Cela confirme la nécessité d'un minimum de connaissances SIG avant de s'engager dans une spatialisation des données et des résultats d'ACV, afin d'effectuer les bons choix lors de la mise en œuvre du couplage et d'analyser avec pertinence les résultats.

Pour finir, l'utilisation du SIG pour l'ACV est en pleine expansion depuis quelques années. Nous pouvons donc nous attendre à de nombreux développements dans le futur pour faciliter ce couplage. Tout d'abord, plusieurs auteurs (Mutel et al, 2012 ; Koellner et al, 2013 ; Kounina et al, 2014 ; Cucurachi & Heijungs, 2014) ont souligné l'importance d'évaluer la validité des facteurs de caractérisation régionalisés afin de proposer aux praticiens une échelle pertinente pour chaque catégorie et un guide d'utilisation des facteurs spatialisés. Les bases de données sont également amenées à être affinées dans le futur pour assurer une cohésion des résultats régionalisés entre les procédés de premier plan et d'arrière-plan (Mutel & Hellweg, 2009). Cette évolution a déjà commencé avec ecoinvent v3 mais la cohérence et la fiabilité des données est encore à améliorer (p.ex. nécessité de faire correspondre un procédé référencé pour un pays et des facteurs de caractérisation à l'échelle de la maille). Enfin, l'amélioration des méthodes d'évaluation d'impacts et des données d'inventaire devraient pousser à l'implémentation de fonctionnalités SIG dans les logiciels ACV. On observe déjà des intentions chez certains développeurs, notamment de la part de GreenDelta GmbH pour OpenLCA.

Conclusion

Cette étude a permis d'identifier les pratiques des experts ACV en termes de couplage avec le SIG. Son utilisation s'est beaucoup répandue ces dernières années, soit pour spatialiser l'inventaire, soit pour développer des facteurs de caractérisation spatialisés. Cependant, les études intégrant le SIG pour ces deux étapes restent rares. Les cas d'étude ont permis de déterminer la faisabilité et d'identifier les limitations d'un couplage (notamment liées aux compétences requises et au manque de fonctionnalités des logiciels et bases de données ACV). Enfin, ces travaux nous ont permis de dresser des recommandations pratiques, représentées sous forme d'arbre de décision pour guider le praticien selon les objectifs et champ de l'étude, mais aussi selon les compétences mises à disposition.

Bibliographie

- Azapagic, a., Chalabi, Z., Fletcher, T., Grundy, C., Jones, M., Leonardi, G., ... Vardoulakis, S. (2013). An integrated approach to assessing the environmental and health impacts of pollution in the urban environment: Methodology and a case study. *Process Safety and Environmental Protection*, 91(6), 508–520. doi:10.1016/j.psep.2012.11.004
- Boulay A.-M., Bulle C., Bayart J.-B., Deschênes L., Margni M. (2011). Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health. *Envir. Sci. Technol.* 45, 8948-8957.
- Cao V., Margni M., Favis B., Deschênes L. (2015). Aggregated indicator to assess land use impacts in life cycle assessment (LCA) based on the economic value of ecosystem services. *J of Cleaner Prod* 94, 56-66.
- Cucurachi, S., Heijungs, R. (2014). Characterisation factors for life cycle impact assessment of sound emissions. *Sci. of the Tot. Envir.* 468-469, 280-291.
- de Baan, L., Mutel, C.L., Curran, M., Hellweg, S., Koellner, T. (2013). Land Use in Life Cycle Assessment: Global Characterization Factors Based on Regional and Global Potential Species Extinction. *Envir. Sci. Technol.* 47, 9281-9290.
- Delivand, M. K., Cammerino, A. R. B., Garofalo, P., & Monteleone, M. (2015). Optimal locations of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG emissions: a case study on electricity productions in South Italy. *Journal of Cleaner Production*, 99, 129–139. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.018
- Dresen, B., & Jandewerth, M. (2012). Integration of spatial analyses into LCA-calculating GHG emissions with geoinformation systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(9), 1094–1103. doi:10.1007/s11367-011-0378-3
- Eufrazio Espinosa, R. M., & Stevenson, F. (2013). Spatial life cycle energy model of dwellings within a bioregional context Initial steps. *PLEA 2013: Sustainable Architecture for a Renewable Future*, (September).
- Gasol, C. M., Gabarrell, X., Rigola, M., González-García, S., & Rieradevall, J. (2011). Environmental assessment: (LCA) and spatial modelling (GIS) of energy crop implementation on local scale. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2975–2985. doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.041
- Geyer, R., Stoms, D., & Kallaos, J. (2013). Spatially-explicit life cycle assessment of sun-to-wheels transportation pathways in the U.S. *Environmental Science and Technology*, 47(2), 1170–1176. doi:10.1021/es302959h
- Heijungs, R. (2012). Spatial differentiation, GIS-based regionalization, hyperregionalization, and the boundaries of LCA. In: Ioppolo, G. (eds.) *Environment and Energy* (Editorial series of Italian Commodity Science Academy and Engineering Association of Messina) FrancoAngeli, Milano, Italy, p. 165-176.
- 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. *Int J LCA* 17, 646-654.
- Huijbregts M.A.J., Schöpp W., Verkuijlen E., Heijungs R., Rijnders L. (2001). Spatially Explicit Characterization of Acidifying and Eutrophying Air Pollution in Life-Cycle Assessment. *J of Indus Ecology* 4(3), 75-92.
- Koellner, T., de Baan, L., Beck, T., Brandao, M., Civit, B., Goedkoop, M., Margni, M., Milà i Canals, L., Müller-Wenk, R., Weidema, B., Wittstock, B. (2013). Principles for life cycle inventories of land use on a global scale. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1203-1215. doi: 10.1007/s11367-012-0392-0

- Kounina, A., Margni, M., Shaked, S., Bulle, C., Jolliet, O. (2014). Spatial analysis of toxic emissions in LCA: A sub-continental nested USEtox model with freshwater archetypes. *Environment International* 69, 67-89.
- Loiseau, E., Roux, P., Junqua, G., Maurel, P., & Bellon-Maurel, V. (2014). Implementation of an adapted LCA framework to environmental assessment of a territory: Important learning points from a French Mediterranean case study. *Journal of Cleaner Production*, 80, 17–29. doi:10.1016/j.jclepro.2014.05.059
- Mutel, C., Pfister, S., Hellweg, S. (2012). GIS-Based Regionalized Life Cycle Assessment: How Big Is Small Enough? Methodology and Case Study of Electricity Generation. *Envir. Sci. Technol.*,46, 1096-1103.
- Mutel, C. & Hellweg, S. (2009). Regionalized Life Cycle Assessment: Computational Methodology and Application to Inventory Databases. *Envir. Sci. Technol.*,43, 5797-5803.
- Nahlik, M. J., Kaehr, A. T., Chester, M. V., Horvath, A., & Taptich, M. N. (2015). Goods Movement Life Cycle Assessment for Greenhouse Gas Reduction Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 00(0), n/a–n/a. doi:10.1111/jiec.12277
- Newell, J. P., & Vos, R. O. (2011). “Papering” Over Space and Place: Product Carbon Footprint Modeling in the Global Paper Industry. *Annals of the Association of American Geographers*, 101(4), 730–741. doi:10.1080/00045608.2011.567929
- Nichols, B. G., & Kockelman, K. M. (2014). Life-cycle energy implications of different residential settings: Recognizing buildings, travel, and public infrastructure. *Energy Policy*, 68, 232–242. doi:10.1016/j.enpol.2013.12.062
- Núñez M., Antón A., Muñoz P., Reiradevall J. (2013). Inclusion of soil erosion impacts in life cycle assessment on a global scale: application to energy crops in Spain. *Int J LCA* 18, 755-767.
- Ooba, M., Hayashi, K., Fujii, M., Fujita, T., Machimura, T., & Matsui, T. (2015). A long-term assessment of ecological-economic sustainability of woody biomass production in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 88, 318–325. doi:10.1016/j.jclepro.2014.09.072
- Pfister, S., Bayer, P., Koehler, A., Hellweg, S. (2011). Environmental Impacts of Water Use in Global Crop Production: Hotspots and Trade-Offs with Land Use. *Envir. Sci. Technol.* 45, 5761-5768
- Pfister, S., Koehler, A., Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Envir. Sci. Technol.* 43, 4098-4104
- Rodríguez C., Ciroth A., Srocka M. (2014). The importance of regionalized LCIA in agricultural LCA – new software implementation and case study. In: Schenck, R., Huizenga, D. (Eds.), 2014. Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector (LCA Food 2014), 8-10 October 2014, San Francisco, USA. ACLCA, Vashon, WA, USA.
- Roy P.-O., Deschênes L., Margni M. (2014). Uncertainty and spatial variability in characterization factors for aquatic acidification at the global scale. In *J LCA* 19, 882-890.
- Sala S., Marinov D., Pennington D. (2011). Spatial differentiation of chemical removal rates from air in life cycle impact assessment. *Int J LCA* 16, 748-760.
- Saner, D., Vadenbo, C., Steubing, B., & Hellweg, S. (2014). Regionalized LCA-based optimization of building energy supply: Method and case study for a swiss municipality. *Environmental Science and Technology*, 48, 7651–7659. doi:10.1021/es500151q
- van Zelm R., Schipper A.M., Rombouts M., Snejpangers J., Huijbregts M.A.J. (2011). Implementing Groundwater Extraction in Life Cycle Impact Assessment: Characterization Factors Based on Plant Species Richness for the Netherlands. *Envir. Sci. Technol.* 45, 629-635.