

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

RAPPORT FINAL

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.

Comité de suivi pour SCORE LCA : Jean-Paul Cazalets – Total, Caroline De-Zutter – ENGIE, Daniel Dunet – Veolia R&I, Barbara Forrière – Renault, Jade Garcia – SCORE LCA, Anne Grau – EDF, Denis Le Boulch – EDF, Séverine Méhier – Veolia R&I, Stéphane Morel – Renault, Philippe Osset – SCORE LCA, Anne Prieur – ENGIE, Olivier Réthoré – ADEME, Christèle Wojewodka – Saint Gobain.

SOMMAIRE

<i>Résumé</i>	5
<i>Summary</i>	6
I. Etat de l'art	9
1 Introduction	9
2 Présentation des systèmes d'information géographique	9
2.1 <i>Grands principes de la cartographie</i>	9
2.2 <i>Grands principes des systèmes d'information géographique</i>	13
2.3 <i>Logiciels, formats, standards et interopérabilité</i>	16
2.4 <i>Bases de données existantes</i>	18
3 Couplage SIG et inventaire de cycle de vie (ICV)	21
3.1 <i>Utilisation de bases de données spatialisées</i>	22
3.2 <i>Traitement de données SIG</i>	23
4 Couplage SIG et caractérisation des impacts	26
4.1 <i>Utilisation de données SIG pour FCs spatialisés</i>	26
4.2 <i>Génération de FCs géoréférencés</i>	27
5 Utilisation du SIG pour une évaluation complète	34
6 Logiciels et bases de données d'ACV	35
6.1 <i>Logiciels d'ACV</i>	35
6.2 <i>Bases de données ACV</i>	36
6.3 <i>Résumé</i>	37
7 Conclusion	38
II. Cas d'études	40
1 Cas d'étude n°1 : Automobile et impacts locaux → couplage fort	40
1.1 <i>Description des procédés</i>	40
1.2 <i>Utilisation du SIG</i>	41
1.3 <i>Fonctionnement du plug-in</i>	42
1.4 <i>Présentation des résultats</i>	42
1.5 <i>Conclusions</i>	44
2 Cas d'étude n°2 : ACV des bâtiments à l'échelle urbaine → Couplage faible	45
2.1 <i>Description du cas d'étude</i>	45

2.2	<i>Méthodologie</i>	46
2.3	<i>Utilisation du SIG pour générer l'inventaire du cycle de vie</i>	46
2.4	<i>Inventaire du Cycle de Vie</i>	48
2.5	<i>Analyse d'impact</i>	49
2.6	<i>Attribution des impacts aux bâtiments</i>	49
2.7	<i>Résultats</i>	50
2.8	<i>Écarts en termes de charge de travaux</i>	51
2.9	<i>Conclusions</i>	52
III.	Recommandations	53
1	Introduction	53
2	Pertinence du couplage selon les objectifs et champ de l'étude	53
2.1	<i>Type d'application</i>	53
2.2	<i>Contexte de décision</i>	54
2.3	<i>Audience</i>	54
2.4	<i>Secteur</i>	54
2.5	<i>Unité fonctionnelle</i>	54
2.6	<i>Critères de qualité de données</i>	54
2.7	<i>Impacts environnementaux</i>	55
2.8	<i>Récapitulatif</i>	55
3	Mise en œuvre du couplage	56
3.1	<i>Niveaux de couplage</i>	56
3.2	<i>Récapitulatif</i>	58
4	Recommandations	59
4.1	<i>Type de couplage</i>	59
4.2	<i>Recommandations pratiques</i>	60
5	Limitations et discussion	63
5.1	<i>Barrières d'implémentation</i>	63
5.2	<i>Précautions d'utilisation</i>	64
5.3	<i>Développements futurs</i>	64
6	Conclusion	65
	Bibliographie	67

Résumé

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.

Une revue extensive de la littérature scientifique a été effectuée en considérant plus de cinquante publications ayant utilisé le SIG pour affiner les données spatiales en ACV. La spatialisation de l'inventaire (pour les secteurs de l'agriculture, des transports, des infrastructures et de l'énergie) peut être générée à partir de couches existantes et visualisée sous forme de cartes. Des opérations plus avancées de traitement permettent d'obtenir de nouvelles données d'entrée (p.ex. distance de transport) ou de résoudre des problèmes d'optimisation spatiale. L'application de SIG pour générer des facteurs de caractérisation (FCs) spatialisés a été effectuée pour des catégories sensibles à la géographie (p.ex. toxicité, acidification, eutrophisation, utilisation des terres ou de l'eau). La génération de FCs géoréférencés permet une résolution fine et le couplage avec des données d'inventaire également géoréférencées. Un nombre limité d'études ont appliqué le SIG pour toutes les étapes de l'ACV.

Concernant les outils ACV, la plupart des logiciels ne possèdent pas de fonction compatible avec le SIG tandis que les logiciels libres (OpenLCA et Brightway2) permettent l'adaptation aux données spatialisées au prix d'un effort additionnel. Les bases de données ACV incluent des données régionalisées mais seule la base de données ecoinvent 3 permet le stockage de coordonnées géographiques.

La réalisation de deux cas d'étude pour deux secteurs différents (automobile et bâtiments) ont permis de montrer la faisabilité et limites d'un couplage faible et fort entre le SIG et l'ACV. Ceux-ci sont utiles pour augmenter la disponibilité des données, générer de nouvelles données spatialisées, affiner le calcul d'impact via la superposition des données d'inventaire et des FCs spatialisés et de visualiser les résultats sous forme de cartes. Cependant, des contraintes ont été soulevées, notamment liées aux compétences requises.

A partir de l'état de l'art, des cas d'études, des discussions avec les membres SCORE LCA et des points de vue personnels des auteurs, des recommandations pratiques ont pu être dressées. Par rapport à la définition des objectifs et champ de l'étude, le plus grand intérêt concerne une application comme support à la décision, notamment pour une stratégie territoriale ou une optimisation spatiale. La spécification géographique de l'unité fonctionnelle, la nécessité d'une résolution spatiale des données et le caractère régional des impacts considérés augmente la pertinence du couplage. Trois types de couplage ont été distingués : i) absence de couplage (utilisation manuelle du SIG) facile à mettre en place mais valide pour un faible nombre de données et peu répliquable ; ii) couplage faible (semi-automatisation des échanges) nécessitant des compétences en SIG ou informatique, pouvant traiter plus de données ; et iii) couplage fort (automatisation complète avec feedback) permettant de traiter des problèmes plus complexes grâce à des compétences informatiques avancées. L'arbre de décision développé dans ce rapport permet de guider le praticien ACV dans son choix de couplage selon les objectifs et champ de l'étude, la quantité de données, le temps et les compétences disponibles. Enfin, les barrières d'implémentation ont été identifiées (disponibilité des données, compétences requises, charge de travail). Des précautions d'utilisation ont également été soulevées par rapport au choix de l'échelle et à l'interprétation des résultats, qui démontrent la nécessité d'un niveau minimum en SIG pour la mise en place d'un couplage. Pour finir, les avancements en ACV vis-à-vis du développement et de l'utilisation de base de données et de méthodes spatialisées vont faciliter leur application et intégration dans les logiciels ACV.

MOTS CLES

Systèmes d'Information géographique, couplage, spatialisation, base de données

Summary

The experts in Life Cycle Assessment (LCA) have turned towards a regionalisation of impacts in the years 2000 that was intensified in the last years thanks to the use of Geographical Information Systems (GIS). However, the studies coupling GIS and LCA are still in the research field. The goal of this study is to establish the state of the art, define the feasibility and propose recommendations for implementation of a coupling between LCA and GIS.

An extensive review of the scientific literature has been carried out considering more than fifty publications using GIS to refine spatial data in LCA. The spatialization of inventory (for the agriculture, transportation, infrastructures and energy sectors) can be achieved based on existing layers and visualised as maps. More advanced processing operations allow obtaining new input data (e.g. transport distance) or to solve spatial optimization problems. The application of SIG to generate spatialized characterization factors (CFs) has been carried out for categories sensible to the geography (e.g. toxicity, eutrophication, land use or water use). The generation of georeferenced CFs allows for a fine resolution and the coupling with georeferenced inventory data. A limited number of studies used GIS for all stages of LCA.

Concerning LCA tools, most of the programs do not have GIS compatible functions whereas free software (OpenLCA and Brightway2) allow for the adaptation to spatial data at the cost of an additional effort. LCA databases include regionalised data but the ecoinvent 3 database only allows for stocking geographical coordinates.

The achievement of two case studies for two different sectors (automotive and buildings) allowed us to show the feasibility and limits of a weak and strong coupling between GIS and LCA. These are useful to increase the data availability, generate new spatialized data, to refine the impact calculation via the superimposition of inventory data and spatialized CFs and to visualise results as maps. However, some constraints were raised, linked to the required competences.

Based on the state of the art, on the discussion with the members of SCORE LCA and on the authors' point of view, practical recommendations have been set up. Regarding the definition of goal and scope of the study, the greatest interest concerns the application for decision support, especially for a territorial strategy or spatial optimization. The geographical specification of the functional unit, the need for a spatial resolution of data and the regional character of considered impacts increase the relevance of the coupling. Three types of coupling were distinguished: i) absence of coupling (manual usage of GIS) easy to put in practice but valid for a small data amount and not replicable; ii) weak coupling (semi-automation of exchanges) requiring GIS or IT, making it possible to process bigger amount of data; and iii) strong coupling (complete automation with feedback) allowing for tackling more complex problems by means of advanced IT expertise. The developed decision tree makes it possible to guide the LCA practitioner in the choice of the coupling depending on the goals and scope of the study, data amount, availability of time and competences. Finally, implementation barriers were identified (data availability, required competences, work load). Usage precautions were also raised with respect to the selection of the scale and results interpretation, revealing the need for minimum expertise to set up a coupling. To conclude, the advancements in LCA regarding the development and utilization of spatialized databases and methods will facilitate their application and integration in the LCA programs.

KEY WORDS

Geographical Information systems, coupling, spatialization, database.

Liste des figures

Figure 1 : Représentation d'un géoïde et les ellipsoïdes globale et locale	10
Figure 2 : Système de coordonnées géographiques	11
Figure 3 : Projection d'un raster	14
Figure 4 : Différents objets vectoriels	14
Figure 5 : Exemple de couche vectorielle et d'utilisation de données alphanumériques dans le logiciel QGIS.....	15
Figure 6 : Emissions de dioxyde de carbone englobées dans les bâtiments de la ville de Los Angeles – USA (Reyna and Chester, 2013).....	22
Figure 7 : Utilisation des SIG pour identifier les fournisseurs de l'usine de méthanisation et les distances par la route (Dresen and Jandewerth 2012)	23
Figure 8 : a) Terre potentielle pour la culture de Brassica sp. Et Populus sp.; b)Potentiel de réduction des émissions de CO2 dans une stratégie d'implémentation des cultures pour la production d'énergie (Gasol et al., 2011)	24
Figure 9 : Localisation optimale des installations pour traiter les biomasses et bassins de fourniture dans quatre scénarios différents (Delivand et al., 2015).....	25
Figure 10 : Résultats pour la fourniture d'énergie des bâtiments dans une petite commune suisse pour le cas de référence (à gauche) et pour le cas optimisé par analyse multi-objective agrégés par hectare : émissions annuelles de gaz à effet serre (Adapté de Saner et al, 2014)	26
Figure 11 : Facteurs de devenir (« fate factors » - FFs) cumulés pour les émissions de phosphore dans les eaux douces avec une résolution d'un demi-degré	28
Figure 12 : FCs par maille (en day.kg P ⁻¹ .m ³) pour les lacs déterminés avec les facteurs d'effet marginaux.....	29
Figure 13 : FCs pour l'acidification aquatique à 2 x 2,5 degré pour des émissions de a) NOx, b) NH3 et c) SO2. d) Boîte à moustache des distributions des 13104 FCs calculés.	29
Figure 14 : FCs pour l'épuisement des ressources (a) et la qualité des écosystèmes (b)	31
Figure 15 : CFs pour l'indice de stress hydrique au niveau des bassins versants du monde	32
Figure 16 : FCs pour les impacts dus à l'ombrage des eaux de mer.....	33
Figure 17 : Les trois sous-systèmes en ACV (technique, environnemental et social) représentés comme couches SIG (Bengtsson et al, 1998).....	34
Figure 18: Frontières du système étudié.....	40
Figure 19: Résultats du plug-in pour la toxicité humaine	43
Figure 20: Résultats du plug-in pour le stress hydrique.....	43
Figure 21: Résultats du plug-in pour ReCiPe (comparaison des trois scénarios)	44
Figure 22: Données SIG fournies par la ville de Rotterdam : a. Modèle Numérique d'Élévation obtenu à partir de données LiDAR ; b. Couche vectorielle des empreintes des bâtiments.	45
Figure 23: Couplage SIG-ACV réalisé pour le cas d'étude 2.....	46
Figure 24: Données générées grâce au SIG : a. surface de plancher des bâtiments ; b. hauteur moyenne des bâtiments.	47
Figure 25: Carte du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) annuel lié à la fourniture d'électricité (a.) et d'eau potable (b.) pour la ville de Rotterdam – Pays Bas.	50

Figure 26: Carte du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) annuel sans ou avec la rénovation des bâtiments résidentiels de la ville de Rotterdam (a. et b. respectivement).....	51
Figure 27: Carte du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) annuel sans rénover les bâtiments résidentiels de la ville de Rotterdam. Résultats agrégés à l'échelle de quartier.....	51
Figure 28 : Arbre de décision pour le choix type de couplage ACV-SIG recommandé	60
Figure 29 : Résultats d'analyse d'impact montrés en SIG comme points (a.) et polygones (b.).	62
Figure 30 : Carte du potentielle de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) des bâtiments résidentiels de la ville de Rotterdam : a. à l'échelle de quartier ; b. à l'échelle de la ville....	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différents types de projections	12
Tableau 2 : Description des bases de données SIG (gratuites).....	18
Tableau 3 : Intérêt du couplage ACV-SIG en fonction des objectifs et champ de l'étude	55
Tableau 4 : Compétences, charge de travail et quantité de données SIG en fonction des types de couplage SIG – ACV	58
Tableau 5 : Bases de données disponibles publiquement et pertinence avec différents secteurs.....	61

I. Etat de l'art

1 Introduction

Cette première partie présente un état de l'art de l'utilisation de système d'information géographique (SIG) en Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'intérêt pour le couplage entre ces deux outils s'est accru ces dernières années afin d'affiner les résultats ACV selon leur dimension spatiale. L'équipe projet du Luxembourg Institute of Science & Technology (LIST) a exploré plus de 50 articles dans le domaine de l'ACV qui s'appuient sur des données ou modèles SIG pour le calcul d'inventaire ou d'évaluation d'impacts. L'objectif de cet état de l'art est de comprendre les principes de SIG, les possibilités d'application pour les différentes phases de l'ACV et la compatibilité des outils ACV avec l'utilisation de SIG. Nous présentons donc d'abord les concepts autour du SIG (systèmes de coordonnées géographiques, systèmes de projection, couches SIG, formats, logiciels et bases de données). La seconde partie se concentre sur les études ayant utilisé le SIG pour l'inventaire du cycle de vie, que ce soit simplement pour extraire des informations spatialisées ou pour effectuer des opérations dans l'espace pour calculer des données d'inventaire. Ensuite, les couplages SIG avec le développement de facteurs de caractérisation d'impact sont détaillés. Cette spatialisation est particulièrement importante pour les impacts à échelle locale tels que l'eutrophisation, l'acidification, la toxicité, l'utilisation des terres ou de l'eau. Quelques articles ayant pris en compte des informations SIG pour toutes les étapes d'une évaluation ACV (inventaire et caractérisation des impacts) sont aussi identifiés, mêmes s'ils restent rares. Enfin, les possibilités des logiciels et bases de données d'ACV concernant la spatialisation et l'interaction avec des SIG sont étudiées.

2 Présentation des systèmes d'information géographique

2.1 Grands principes de la cartographie

Selon le Trésor de la Langue Française informatisé (TLFi)¹, la cartographie se présente comme étant la « théorie et technique de l'établissement des cartes géographiques et la réalisation de cartes ». Toujours selon le TLFi, la carte est un « support d'information scientifique et/ou technique » et, dans son sens restreint, une « représentation graphique conventionnelle, sur un support [...], de données concrètes ou abstraites localisées sur le globe terrestre ».

2.1.1 Systèmes géodésiques

Afin de localiser un point à la surface du globe, on recourt généralement à un *système géodésique*. La Terre n'étant pas une sphère parfaite, on utilise en première approximation un *système géodésique par ellipsoïde*, défini selon son centre, son demi grand axe et son coefficient d'aplatissement. Plusieurs systèmes géodésiques existent concurremment. En effet, en réalité, la Terre est une surface complexe, appelée « géoïde », qui s'apparente à un ellipsoïde déformé, du fait d'une répartition non homogène de la masse terrestre. De fait, l'utilisation d'un système géodésique ellipsoïde induit irrémédiablement une faible erreur lors du calcul de coordonnées (cf. section suivante). Deux types de systèmes géodésiques coexistent (Figure 1) :

¹ <http://atilf.atilf.fr/dendien/scripts/tlfiv4/showps.exe?p=combi.htm;java=no>

- Les systèmes globaux, utilisés pour représenter l'intégralité du globe. Le plus utilisé est le WGS84, système de référence utilisé par le GPS ;
- Les systèmes locaux. Ces systèmes sont adaptés à la forme locale du géoïde et permettent donc une meilleure précision dans la région à laquelle ils sont adaptés. Toutefois, leur marge d'erreur devient plus importante que les systèmes globaux lorsque l'on quitte leur plage d'utilisation. Parmi ces systèmes, on trouve le RGF93 pour la France ou le NAD83 pour les États-Unis.

Les systèmes géodésiques sont couramment nommés selon la forme XXX00. Les trois premières lettres correspondent au nom du système, par ex. WGS (*World Geodesic System*) ou RGF (réseau géodésique français). Les deux chiffres suivant le nom du système correspondent à l'année de référence. En effet, la dérive des continents implique une modification constante des points de mesures permettant de calculer le système géodésique. Ainsi, pour l'établissement du RGF93, l'IGN dispose d'un réseau de 1032 stations réparties équitablement sur le territoire métropolitain².

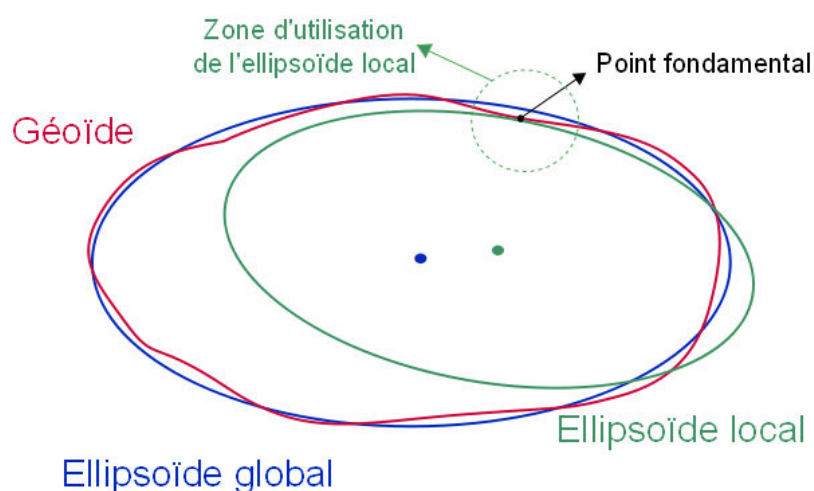


Figure 1 : Représentation d'un géoïde et les ellipsoïdes globale et locale³

2.1.2 Systèmes de coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques, associées à un système géodésique, permettent de situer différents points à la surface du globe. La localisation d'un point à la surface du globe fait appel à la *latitude* (ϕ) et à la *longitude* (λ), sa hauteur par rapport à l'ellipsoïde de référence étant définie par l'*altitude* (h) (Figure 2).

² <http://geodesie.ign.fr/index.php?page=rgf93>

³ http://www.adcs.cnrs.fr/tutoqgis/02_01_intro.php

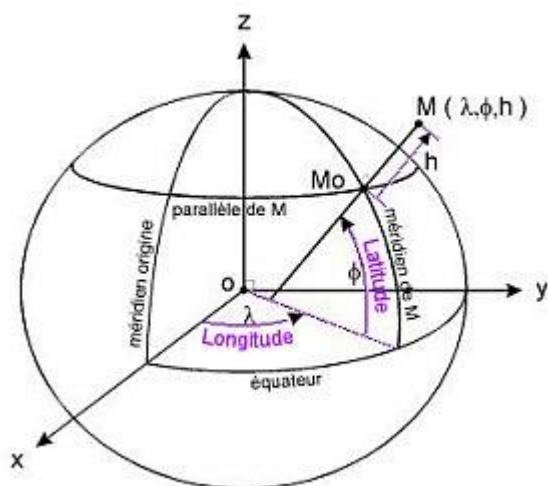


Figure 2 : Système de coordonnées géographiques⁴

Un méridien est un demi-cercle imaginaire reliant les deux pôles et dont tous les points possèdent la même longitude. La longitude est exprimée en degrés, est ou ouest par rapport au méridien de référence de Greenwich. Les méridiens mesurent la même distance sur l'ellipsoïde, soit environ 20 000 km. Un parallèle est un demi-cercle reliant tous les points situés à une même latitude. Contrairement aux méridiens, la longueur des parallèles décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'équateur vers les pôles.

2.1.3 Systèmes de projection

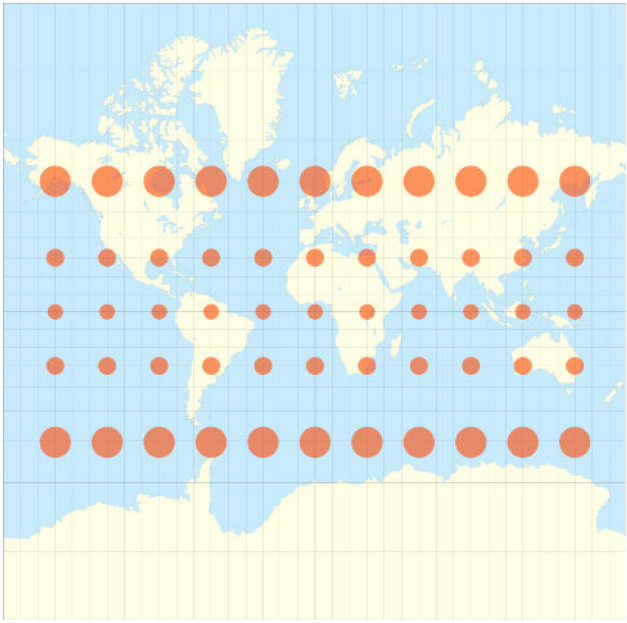
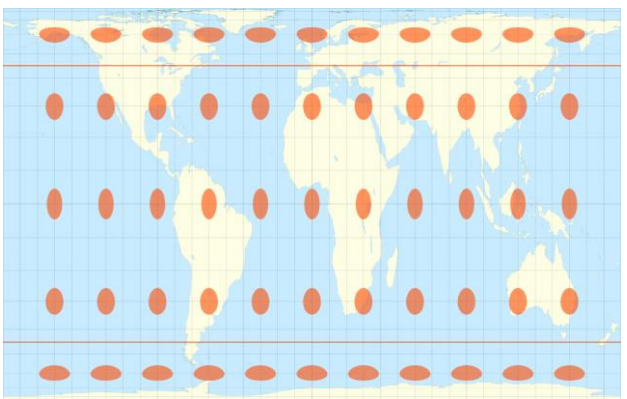
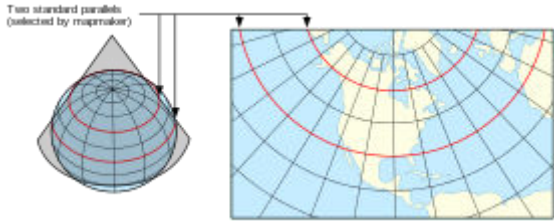
Le globe ne pouvant être représenté sur un plan, différentes projections ont été mises au point (Tableau 1). De manière théorique, une projection est l'ensemble des règles mathématiques permettant d'établir une correspondance entre des coordonnées sur le globe et des coordonnées sur une carte plane. Par définition, la projection induit différents biais qui permettent de dresser la classification suivante :

- projection équivalente : conserve les surfaces mais déforme les angles : les plus connues sont les projections de Peters et Lambert.
- projection conforme : conserve les angles mais pas les surfaces : la plus connue est la projection de Mercator
- projection aphyllactique : ne conserve ni les angles, ni les surfaces : les plus connues sont Winkel Tripel et Robinson.

Par ailleurs, certaines projections sont capables de représenter l'ensemble du globe (par ex. la projection cylindriques, où le globe est projeté sur un triangle) tandis que d'autres ne peuvent représenter qu'un hémisphère (projection conique).

⁴<http://www.sat-info.fr/rubrique,informations-techniques,elements-de-geodesie,systemes-de-coordonnees,coordonnees-geographiques.php>

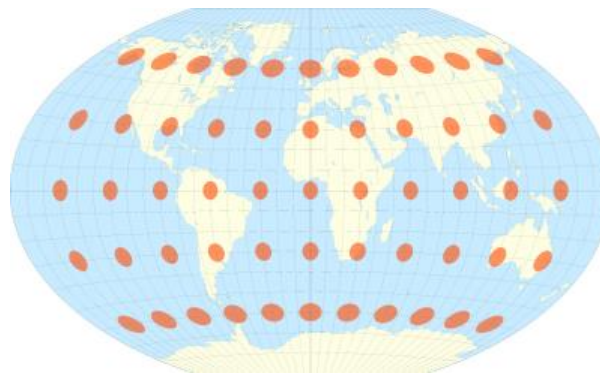
Tableau 1 : Différents types de projections

<p><i>Projection de Mercator.</i></p> <p>Cylindrique, conforme.</p> <p>Résulte de la projection du globe sur un cylindre. Les méridiens et les parallèles se croisent à angle droit et les formes sont donc conservées. Les distances de l'équateur vers les pôles tendent vers l'infini, d'où le non-respect des surfaces augmentant avec la latitude.</p> <p>Cette projection était utilisée par l'API (« Application Programming Interface ») précédente de Googlemaps et est donc la projection par défaut dans OpenLCA.</p>	 <p>http://fr.wikipedia.org/wiki/Projection_de_Mercator</p>
<p><i>Projection de Peters</i></p> <p>Cylindrique, équivalente</p> <p>Comme Mercator, résulte de la projection du globe sur un cylindre. Néanmoins, à l'inverse de Mercator, les surfaces sont respectées tandis que les angles sont déformés. Plus la latitude est haute, plus la déformation des formes est importante (impression d'écrasement).</p>	 <p>http://fr.wikipedia.org/wiki/Projection_de_Peters</p>
<p><i>Projection conique conforme de Lambert.</i></p> <p>Conique, conforme</p> <p>Cette projection permet de représenter une partie du globe en respectant les angles. De par son principe (projection conique), la projection de Lambert permet au mieux de représenter un hémisphère. Il existe une infinité de projections possibles, selon les coordonnées du sommet du cône. La projection respecte bien les surfaces pour les coordonnées proches du sommet du cône mais plus l'on s'éloigne, plus le biais est important. Cette projection est donc particulièrement utilisée pour représenter des régions du globe. En particulier, la projection Lambert 93 reste la plus utilisée pour les cartes représentant la France métropolitaine.</p>	 <p>http://fr.wikipedia.org/wiki/Projection_conique_conforme_de_Lambert</p>

Projection de Winkel-Tripel

Aphylactique.

Winkel-Tripel est une projection moyenne entre la projection cylindrique équidistante et la projection d'Aïtoff (azimutale). Elle n'est ni conforme, ni équidistance, mais constitue un des meilleurs compromis pour représenter l'intégralité du globe.



http://fr.wikipedia.org/wiki/Projection_de_Winkel-Tripel

2.2 Grands principes des systèmes d'information géographique

La société française de photogrammétrie et télédétection a défini en 1989 un système d'information géographique (SIG), comme étant *un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement*. Les SIG manipulent des données, stockées dans des couches, qui peuvent être de deux natures.

Tout d'abord, les données raster sont une couche qui, à la manière d'une image, est décomposée en une grille régulière, organisée en lignes et en colonnes. Chaque cellule de la grille possède une intensité de gris ou une couleur. Les données raster peuvent être de simples images (fichiers *.bmp, *.tiff, etc.) mais peuvent aussi contenir des informations géographiques, telles que les coordonnées du raster, sa résolution spatiale et la projection utilisée. Ces informations sont en effet indispensables pour assurer la compatibilité de l'usage du raster avec d'autres couches. La Figure 3 illustre ce concept. Les quatre cartes obtenues sont issues du même fichier raster (http://www.uneearthedoutdoors.net/global_data/true_marble/download). La figure en haut à gauche est le fichier raster brut. La figure en haut à droite est issue de ce même raster, sur lequel une couche vectorielle contenant les frontières des pays a été rajoutée. Les deux fichiers utilisent le même référentiel géographique et les coordonnées du raster sont correctes, les deux couches sont donc ajustées. La figure en bas à gauche est une re-projection du fichier raster (lambert-93), qui est déformé pour correspondre au nouveau système de projection. La figure en bas à droite représente une erreur de projection, le fichier raster n'étant pas projeté selon le même système que la couche vectorielle contenant les frontières des pays.

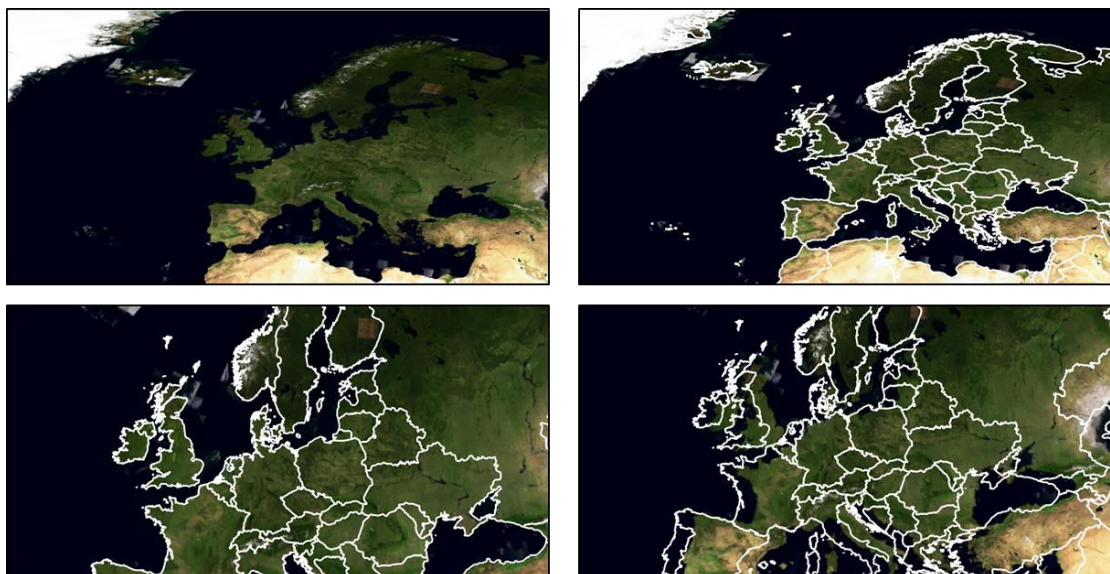


Figure 3 : Projection d'un raster

Les couches vectorielles (p.ex. fichiers .kml, .shp, .shx, .dbf), deuxième type de données SIG, contiennent des objets spatiaux décrits par leurs caractéristiques élémentaires : points, lignes et polygones (Figure 4). A chacun de ces objets sont associées des coordonnées géographiques. Par ailleurs, ces couches peuvent aussi contenir de l'information alphanumérique, sous forme de données associées à chaque objet.

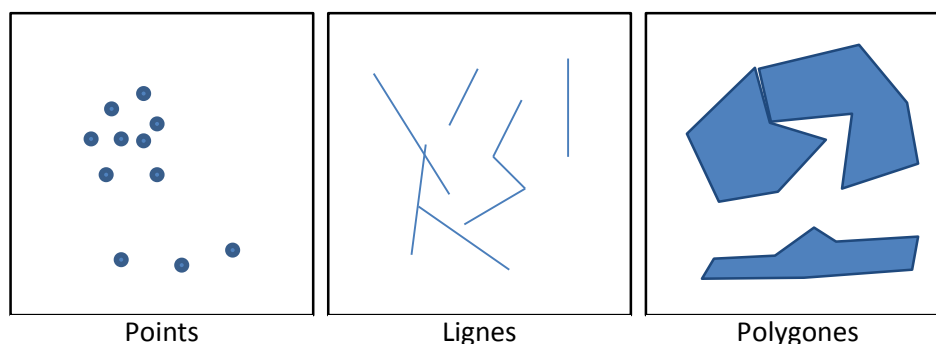


Figure 4 : Différents objets vectoriels

Ces informations peuvent servir à étiqueter la couche, à associer une couleur différente à chaque polygone, etc. La Figure 5 illustre un exemple d'utilisation d'information alphanumérique en plus des coordonnées géographiques des polygones. Ainsi, à partir d'un fichier shapefile (voir Section 1.3.1.) contenant en plus des coordonnées géographiques de chaque pays, le nom et la population de ces derniers, il est possible d'étiqueter cette couche avec le nom des pays et de définir une couleur proportionnelle à la population (Figure 5).

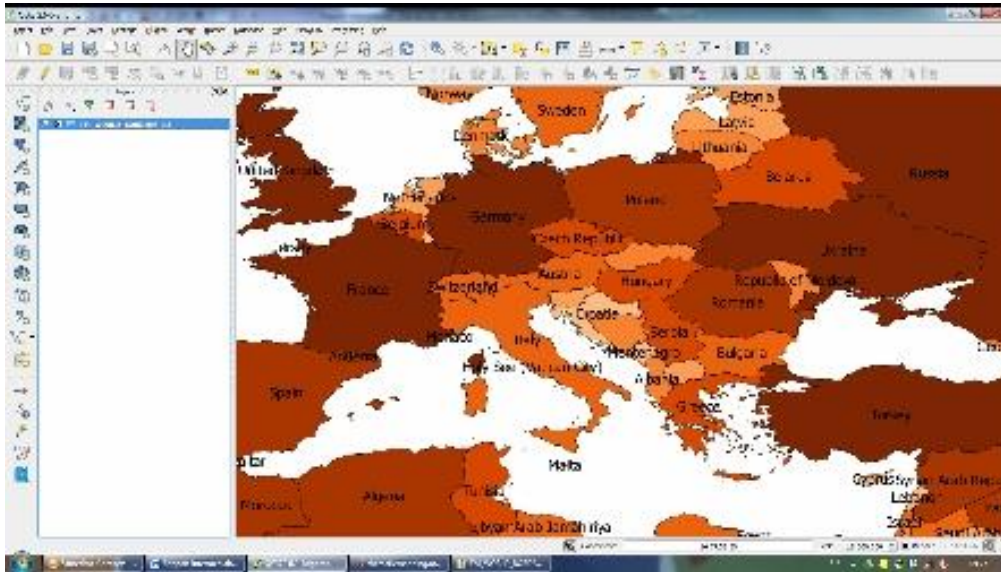


Figure 5 : Exemple de couche vectorielle et d'utilisation de données alphanumériques dans le logiciel QGIS.

Par ailleurs, l'intérêt des SIG ne consiste pas seulement à présenter des informations géographiques mais aussi à les manipuler afin de générer de nouvelles données. Pour cela, selon les logiciels, de nombreuses fonctions sont disponibles. Les plus courantes sont les suivantes :

- Calculs de distances et de surfaces (opération entre couches vectorielles) : calcul de distances entre 2 points, calculs de distances entre voisins les plus proches, longueurs des lignes, longueur du périmètre d'un polygone, surface d'un polygone, etc.

Exemple. Calcule de la surface d'un pays, défini par un polygone dans le SIG.

- Opérations entre différentes couches (couches vectorielles) : union, intersection, exclusion, différences, etc.

Exemple. Si une couche des villes françaises (points) et une couche d'une certaine région (polygone) sont disponibles, il est possible de faire l'intersection entre les deux couches pour obtenir une troisième couche de villes qui appartiennent à cette région.

- Créations de couches : tampons (création de polygones autour de points), transformation de polygones en lignes, vectorisation de couches raster, etc.

Exemple. A partir d'une couche des rivières (lignes), on peut créer des tampons pour définir les zones d'interdiction à la construction à une certaine distance des rivières.

- Calculs de données raster (opérations entre couches raster) : valeurs minimales et maximales, moyenne, re-projection, statistiques, etc.

Exemple. Calcul de l'élévation moyenne, maximale et minimale du terrain dans une région en utilisant une couche raster de données d'élévation.

Enfin, outre les interfaces graphiques proposées par les logiciels, il est aussi généralement possible de manipuler les données contenues dans les couches en utilisant SQL (« Structure Query Language » - langage informatique normalisé pour exploiter des bases de données). En particulier, lorsque le système étudié contient un grand nombre de données, SQL s'avère très utile pour gérer les données existantes ainsi qu'en obtenir de nouvelles. Ainsi, une base SQL contient généralement des tableaux, dont les colonnes sont des champs (par exemple 'code ISO du pays', 'surface agricole', 'population', etc.) et les lignes des valeurs (par ex. 'France', 'Allemagne', 'Luxembourg', etc.). Les différents tableaux peuvent être reliés entre eux, via la définition de clés. Ainsi, il est possible par

exemple de relier un tableau contenant les champs 'code ISO du pays', 'population' et un tableau contenant 'code ISO du pays', 'surface agricole', en définissant le code ISO comme champ commun aux deux tableaux.

En effet, pour simplifier, SQL peut être divisé en deux parties : la manipulation des données et les requêtes.

La manipulation des données consiste à modifier les données présentes dans un tableau ou de créer un nouveau tableau ou de nouvelles relations entre tableaux. Par exemple, il est possible de rajouter un champ, supprimer ou ajouter une ligne, modifier une valeur dans un tableau, etc.

Les requêtes sont l'aspect le plus intéressant de SQL. Elles permettent de générer de nouvelles données en fonctions de différents critères. Par exemple, il est possible de ne sélectionner que les pays dont la population est supérieure à 30 millions d'habitants en effectuant la requête suivante :

<code>SELECT *</code>	Tout sélectionner
<code>FROM Table_countries</code>	dans le tableau contenant les données par pays
<code>WHERE population > 30e6</code>	lorsque la population est supérieure à 30 ^e 6 hab.
<code>ORDER BY population;</code>	classer par population

Il est aussi possible de faire des requêtes sur différents tableaux. Par exemple, il est possible à partir d'un tableau contenant le nom des pays et leur population (Table_countries) et un tableau contenant les villes de plus de 100 000 habitants et le pays où elles se trouvent (Table_Cities), de générer une requête retournant le nombre de villes de plus de 100 000 habitants en fonction de la population du pays.

```
SELECT Table_countries.population,
       count (*) AS cities
FROM Table_countries
      JOIN ISO_code ON Table_countries.ISO_code = Table_Cities .ISO_code
GROUP by Table_countries.population
```

Les requêtes peuvent se combiner pour former des requêtes complexes permettant une grande souplesse dans les résultats possibles.

2.3 Logiciels, formats, standards et interopérabilité

2.3.1 Formats d'échanges, normes et interopérabilité

L'*Open Geospatial Consortium* (OGC, <http://www.opengeospatial.org>) est un consortium regroupant 507 entreprises, agences gouvernementales et universités pour développer des standards permettant l'interopérabilité entre les formats utilisés en SIG et les différentes interfaces susceptibles de les utiliser, en particulier sur le Web, les services et les différentes solutions informatiques logicielles. De fait, dans l'idéal, les fichiers utilisés par les SIG ainsi que ceux utilisés en ACV devraient être conformes aux standards de l'OGC afin de faciliter le couplage entre les deux.

Par ailleurs, en Europe, la directive 2007/2/CE du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne (INSPIRE) a fixé des normes imposant aux Etats membres de suivre une structure commune pour toutes leurs données contenant des informations géographiques. Par ailleurs, toutes ces données sont centralisées au sein du portail Internet Inspire (<http://inspire-geoportal.ec.europa.eu/>) qui permet d'effectuer des recherches à partir de méta-

données dans toutes les langues de l'UE sur l'intégralité des données reportées dans le cadre de la directive 2007/2/CE. De plus, le portail propose un système permettant de vérifier la conformité des données générées en les téléchargeant sur le portail. Les normes édictées dans INSPIRE sont basées sur les travaux de l'OGC. Ainsi, dans l'idéal, les données générées en SIG et les formats choisis devraient être compatibles avec les préconisations de l'OGC afin de faciliter un futur usage des données SIG en ACV. Les types de formats vectoriels les plus utilisés sont :

- Shapefile (type *.shp, *.shx et *.dbf) : défini par l'ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), Shapefile est un standard pour les fichiers vectoriels, standard de facto de nombreux logiciels comme QGIS. Néanmoins, Shapefile n'est pas conforme aux recommandations de l'OGC. Shapefile est un format ouvert.
- Keyhole Markup Language (KML) : développé par Google pour ses applications de géolocalisation, KML est un format ouvert pour les fichiers vectoriels basé sur XML. KML est conforme à l'OGC.

2.3.2 Logiciels

Les logiciels de SIG peuvent se diviser en deux catégories, selon qu'ils soient propriétaires ou libres. Parmi les propriétaires, on retrouve les logiciels gratuits et logiciels commerciaux. Ce paragraphe présente quelques exemples de logiciels (selon qu'ils soient libres ou propriétaires) parmi les plus communs et potentiellement utilisables pour un couplage avec l'ACV. Une revue complète de tous les logiciels de SIG n'est pas l'objet de ce rapport.

Logiciels libres :

- *GRASS GIS* : un des projets OpenSource les plus importants dans le champ du SIG, ce logiciel de conception modulaire offre un ensemble de fonctions pour l'analyse et la gestion de données spatialisées, la production de cartes, la modélisation spatiale et la visualisation. L'usage de QGIS comme interface graphique du logiciel peut être avantageux pour améliorer la facilité d'utilisation en gardant la puissance des fonctions. Site web : <http://grass.osgeo.org/>
- *QGIS* : aussi connu comme *QuantumGIS*, ce logiciel SIG est disponible sous Linux, Mac OS X et Windows. Caractérisé par une interface graphique de simple utilisation, il permet de gérer une grande variété de données de type vectoriel et raster grâce à la bibliothèque GDAL. Il peut être utilisé comme interface graphique du software GRASS GIS. Site web : <http://qgis.org/>
- *SAGA GIS* : logiciel SIG disponible pour Windows et Linux. Le logiciel a une structure modulaire et permet le traitement de données de type vectoriel et raster. Site web : <http://www.saga-gis.org/>
- *PostGIS* : est une extension pour spatialiser la base de données relationnel PostgreSQL. Il ajoute un support pour les objets géographique et permet de formuler des requêtes spatiales. Site web : <http://postgis.net/>

Logiciels propriétaires :

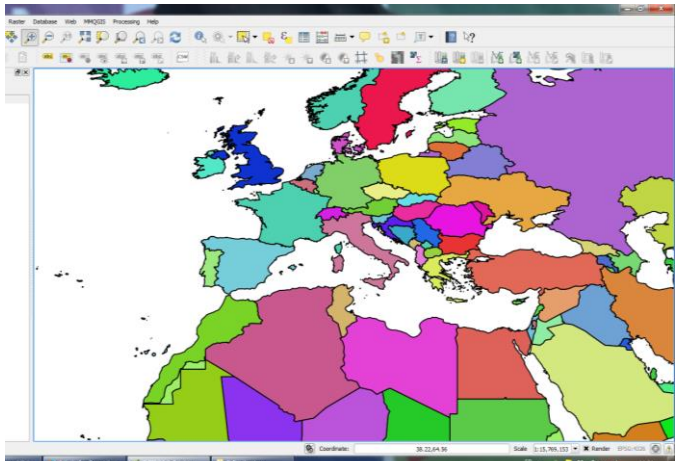
- *ArcGIS* : suite de logiciels SIG de propriété ESRI composé de différentes plateformes de type bureautique, web ou mobile pour générer, utiliser et partager cartes et données spatialisées. Site web <http://www.arcgis.com/>

- MapInfo Professional : suite d'outils et applications SIG (propriétaire Pitney Bowes Software) qui permet nombreuse possibilité de représentation cartographique, analyse spatiale, gestion de données et outils de développement. <http://www.pitneybowes.fr/>
- Google Earth : logiciel de propriété de Google qui permet la visualisation et l'accès à informations géographique, bâtiments 3D, images et reliefs sur le monde entier. Il existe en version gratuite et payante. La version payante offre des outils supplémentaires, tels que mesures avancés et options d'importations et d'impression. <http://earth.google.fr>
- Oracle Spatial and Graph: option pour le système de gestion de base de données relationnel Oracle Database (propriétaire : Oracle Corporation) utilisable pour le stockage et la gestion de données spatialisées et l'exécution de requêtes spatiales. <http://www.oracle.com/>

2.4 Bases de données existantes

Cette section a pour objectif de présenter quelques bases de données accessibles gratuitement sur Internet (liste non exhaustive) et pouvant s'avérer utiles pour un couplage ACV – SIG. Elles sont décrites de façon succincte dans le Tableau 2.

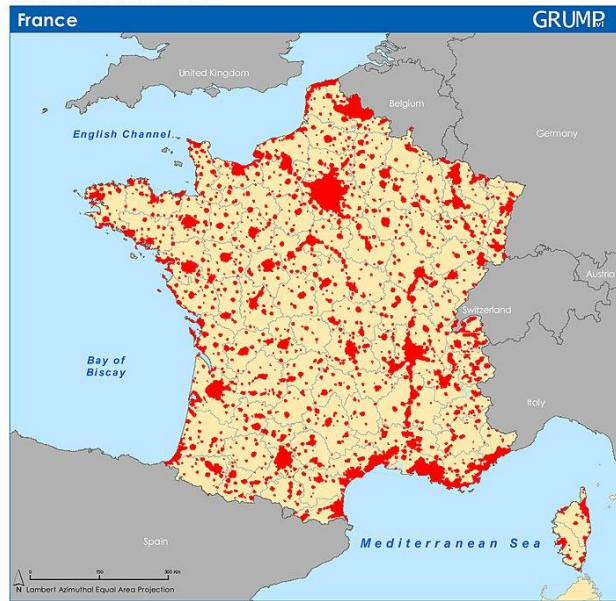
Tableau 2 : Description des bases de données SIG (gratuites)

<p><i>Natural Earth</i></p> <p><i>Natural Earth</i> contient de nombreuses données de base : frontières, villes, reliefs, rivières, etc., à la fois sous forme de données vectorielles et raster. Les données peuvent être téléchargées gratuitement et servir de base à de nombreux projets de SIG. http://www.naturalearthdata.com/</p>	
--	---

Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP)

Proposé par le Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), ce jeu de données contient des informations relatives à la population mondiale mais aussi surtout une cartographie complète des zones urbains à l'échelle mondiale et avec une résolution spatiale de 30 secondes d'arc (1 km). <http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/colection/grump-v1>

URBAN EXTENTS



Global Rural-Urban Mapping Project

- Urban Extent
- Administrative Units
- National Boundaries

Urban extents illustrate the shape and area of urbanized places. Urbanized localities are defined as places with 5,000 or more inhabitants that are delineated by stable night-time lights. For poorly lit areas, alternate sources are used to estimate the extent of cities.

Note: National boundaries are derived from the population grids and thus may appear coarse.

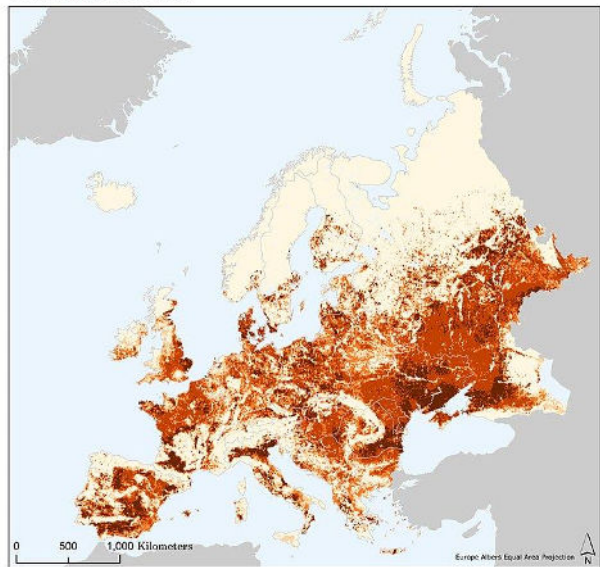
Copyright 2009, The Trustees of Columbia University in the City of New York, Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University, International Food Policy Research Institute (IFPRI), the World Bank, and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP), Population Density, Palisades, NY: CIESIN, Columbia University. Available at: <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw/>

This document is licensed under a Creative Commons 3.0 Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

Socioeconomic Data and Application Center (SEDAC)

Outre les données du projet GRUMP le SEDAC propose de très nombreuses données, telles que des cartes d'usage des sols, d'utilisation d'engrais, etc. Le centre dépend de EOSDIS (NASA's Earth Observing System Data and Information System) et les données peuvent donc être utilisées gratuitement. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/>

Croplands, 2000: Europe
Global Agricultural Lands



Global Croplands in 2000 map the proportion of each 5 minute (10km) grid cell land area that is under cropland. Dark shaded areas denote higher proportions of areas under cropland. Data from Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS) land cover product and Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT) VEGETATION's Global Land Cover 2000 product were combined with UN Food and Agriculture (FAO) agricultural

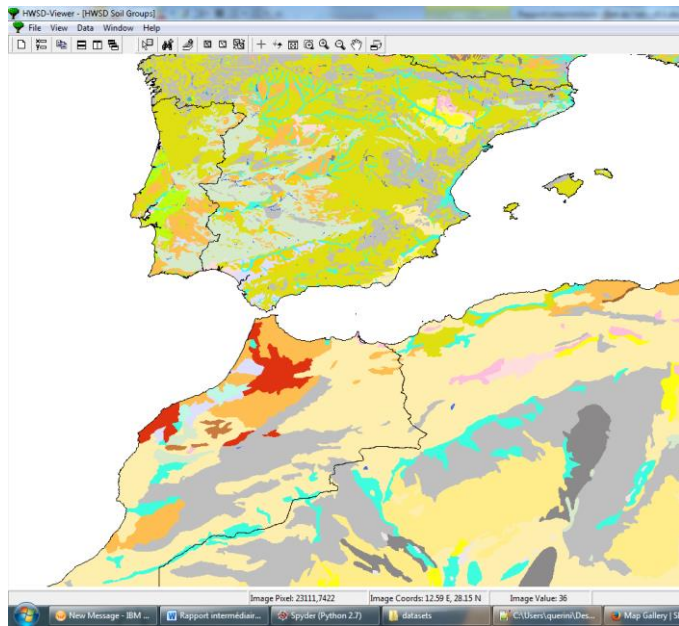
Percent grid cell area under cropland

- Less than 10%
- 10.01% - 25%
- 25.01% - 50%
- 50.01% - 75%
- 75.01% - 100%

Center for International Earth Science Information Network
 Copyright 2010, The Trustees of Columbia University in the City of New York
 Data Source: Berlinburg, W. A. T. and C. M. and J. A. 2010. Global Agricultural Lands: Croplands, 2000. Palisades, NY: NYGIS.
 Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). The Palisades Center for Earth and Environmental Research (PCEER).
 This document is licensed under a Creative Commons 3.0 Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

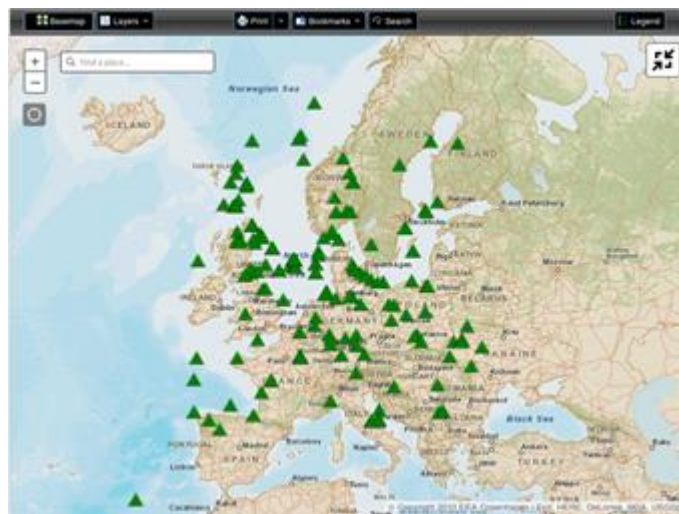
Harmonised World Soil Database (HWSD)

Proposé par IIASA (*International Institute for Applied System Analysis*), la FAO (*Food and Agriculture Organisation*), ISRIC – *World Soil Information* et le JRC (*European Joint Research Centre*), propose une carte de résolution 1km sur le type de sols à l'échelle mondiale (p.ex. alfisols, andisols, etc.). La carte n'est pas accessible directement sous forme d'un raster mais via un programme exécutable s'apparentant à un SIG. La carte peut toutefois être téléchargée via <http://soilgrids1km.isric.org/>, sous forme de différents rasters correspondant chacun à un type de sol donné pour une ou plusieurs régions choisies.



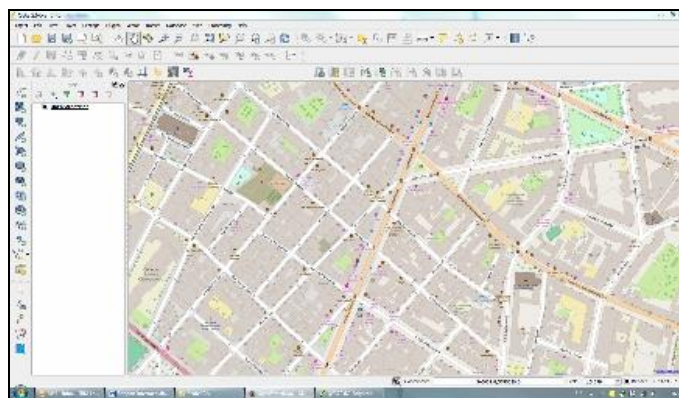
European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR)

Proposé par l'Agence Européenne de l'Environnement, E-PRTR est un jeu de données contenant les émissions polluantes de 28 000 installations industrielles en Europe. Ces installations sont toutes géolocalisées. Les polluants considérés sont : les substances organochlorées, les gaz à effet de serre, les métaux lourds, les substances inorganiques, les pesticides ainsi que d'autres substances non classées. <http://prtr.ec.europa.eu/>



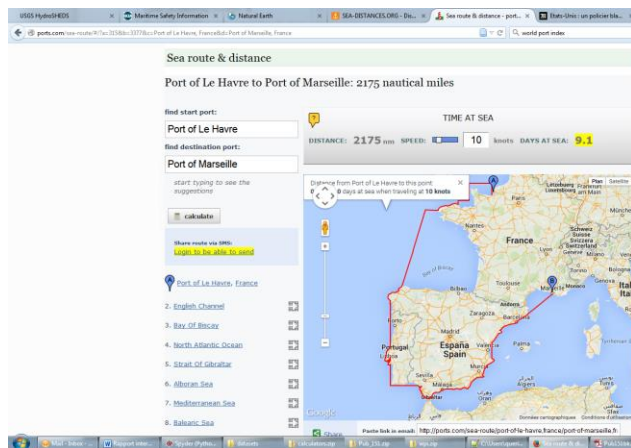
OpenStreetMap (OSM)

OpenStreetMap est une base de données cartographique à laquelle contribuent des personnes volontaires, de manière similaire à Wikipedia. OSM peut être visualisée en ligne mais peut aussi être appelée et utilisée depuis différents logiciels SIG. <http://www.openstreetmap.org/#map=5/51.500/-0.100>.



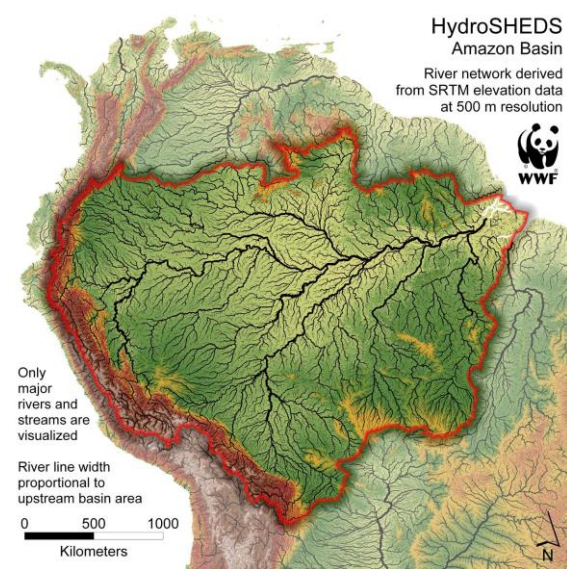
Marine Safety Information (MSI)

Proposé par la NGA (*US National Geospatial-Intelligence Agency*), ce site propose de calculer et de télécharger les distances entre les principaux ports mondiaux sous format *.pdf. http://msi.nga.mil/NGAPortal/MSI.portal?nfpb=true&st=&pageLabel=msi_home_page. Par ailleurs, de nombreux calculateurs existent sur internet pour le calcul de distances maritimes. Parmi ceux-ci : <http://www.sea-distances.org/>, <http://www.portworld.com/map>, <http://ports.com/sea-route/>.



HydroSHEDS

HydroSHEDS contient des données relatives aux rivières et aux bassins versants, à l'échelle mondiale et pour différentes résolutions spatiales : 5 min, 30s, 15s et 3s (de 10km à 90m à l'équateur). Les données sont produites et mise à disposition gratuitement par le Fonds mondial pour la nature (WWF) et l'USGS (*US Geological Survey*). <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/index.php>



3 Couplage SIG et inventaire de cycle de vie (ICV)

Nous détaillons ici le couplage entre SIG et inventaire du cycle de vie. Les SIG permettent d'obtenir des informations spécifiques au site afin de générer ou affiner l'inventaire de cycle de vie en le spatialisant. Si l'importance d'utiliser des données d'inventaire spécifiques au site plutôt que des valeurs moyennes agrégées a été reconnue (voir p.ex. Cousins and Newell, 2015), le SIG peut certainement aussi contribuer à réduire les efforts pour les études à l'échelle territoriale (Loiseau et al., 2014).

Les bases de données spatialisées constituent un moyen efficace pour gérer, traiter et stocker les informations utiles pour l'ACV. Différents niveaux d'application du SIG à l'ICV ont été identifiés dans la littérature scientifique. 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 (section 2.1). Un niveau plus avancé prévoit l'emploi du SIG pour le traitement automatisé de données spatialisées afin de générer de nouvelles données d'inventaire ou pour des analyses avancées, telles que l'analyse d'optimisation spatiale (section 2.2).

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). Les couplages forts sont souvent à déconseiller pour diverses raisons, telles que la faible indépendance fonctionnelle des outils et leur perte d'autonomie. La plupart des couplages identifiés entre ACV et SIG sont de type faible ou absence de couplage.

Les exemples cités s'illustrent dans différents domaines d'application où la dimension spatiale n'est pas négligeable : agriculture, transports et logistique, systèmes urbains et territoriales, bâtiments et infrastructures, énergie ou industrie. La résolution spatiale des études dépend du champ d'application, de l'échelle du quartier et de la ville, à l'échelle régionale, du pays ou continent.

3.1 Utilisation de bases de données spatialisées

Le niveau le plus simple d'utilisation du SIG consiste à exploiter des données spatialisées existantes pour générer l'inventaire, p.ex. sous forme de tableaux, sans réaliser un vrai couplage (outils ACV et SIG séparés). Ce type de spatialisation a été illustré dans plusieurs études visant différents secteurs et échelles. Ooba et al. (2015) s'appuient sur des données spatialisées de forêts (type de forêt, âge, volume de bois, classe du site utilisée) pour évaluer la production de biomasse à partir du bois au Japon. Geyer et al. (2013) ont comparé l'application du photovoltaïque et de la biomasse photosynthétique pour la production d'électricité destinée aux batteries des véhicules électriques aux États-Unis. L'utilisation de cartes de rayonnement solaire leur a permis de calculer le potentiel de production d'électricité et comparer les émissions de dioxyde de carbone relatives aux différents cas envisagés pour le pays entier. D'autres auteurs ont utilisé des couches SIG pour les données relatives aux bâtiments afin d'évaluer les émissions de dioxyde de carbone englobées dans les bâtiments à l'intérieur d'une région métropolitaine (Reyna & Chester, 2013 ; Figure 6) ou l'impact des bâtiments urbains et de la mobilité pour une petite municipalité en Suisse (Saner et al., 2013).

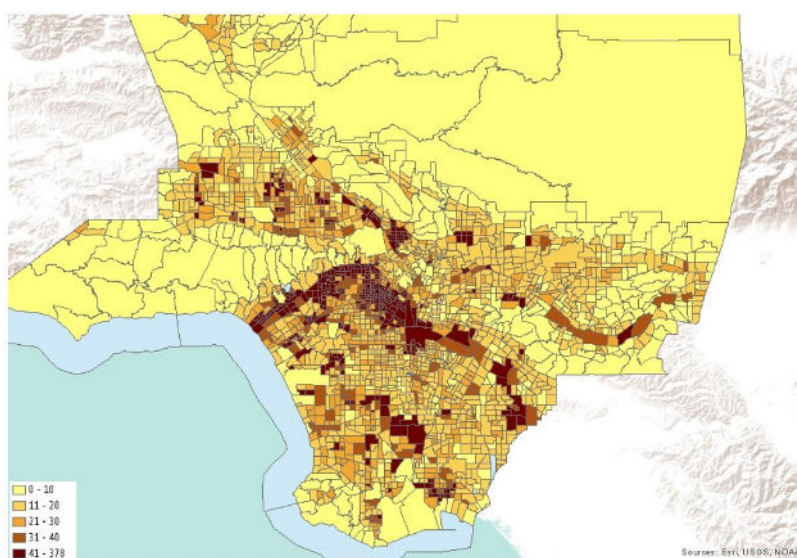


Figure 6 : Emissions de dioxyde de carbone englobées dans les bâtiments de la ville de Los Angeles – USA (Reyna and Chester, 2013)

3.2 Traitement de données SIG

Ce paragraphe décrit les techniques de traitement de données SIG les plus utilisées pour spatialiser l'ICV selon le niveau de couplage et le domaine d'application. Certaines études se limitent à 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'ICV sans qu'aucun échange ou interaction directe prenne place de manière automatique. Si certains auteurs ont automatisé l'entrée de données SIG vers des outils ACV, d'autres ont mis en place un couplage plus fort où les différents outils communiquent entre eux et se donnent un feedback. Un des exemples les plus intéressants est fourni par les problèmes d'optimisation spatiale, où les outils SIG et ACV échangent des informations en continu pour obtenir la solution optimale dans l'espace.

3.2.1 Evaluation des transports

Le SIG permet de calculer la distance entre deux points dans l'espace, à vol d'oiseau ou en suivant un réseau (routes, électrique, d'approvisionnement d'eau, etc.). L'application la plus fréquente de cette fonctionnalité est notamment pour affiner l'évaluation des impacts des transports dans différents secteurs.

Dresen and Jandewerth (2012) ont utilisé le SIG le long d'une chaîne de production de biométhane pour fournir les données d'inventaire relatives aux sites de production, telles que les quantités de fumier ou la distance de distribution entre sites (Figure 7). Dans l'étude sur l'industrie du papier de Newell et al. (2011), le SIG permet d'identifier les moulins où la pâte à papier est produite et ensuite calculer la distance de transport vers les usines de production du papier. Concernant le secteur de la logistique, Nahlik et al. (2015) se sont appuyés sur le SIG pour identifier les routes principales de transport de marchandise en camion, train et bateau afin d'évaluer les infrastructures à prévoir dans le futur. De façon similaire, Asdrubali et al. (2015) ont calculé la distance entre entreprises et fournisseurs dans le cadre de l'ACV des installations d'énergie éolienne refroidies par air.

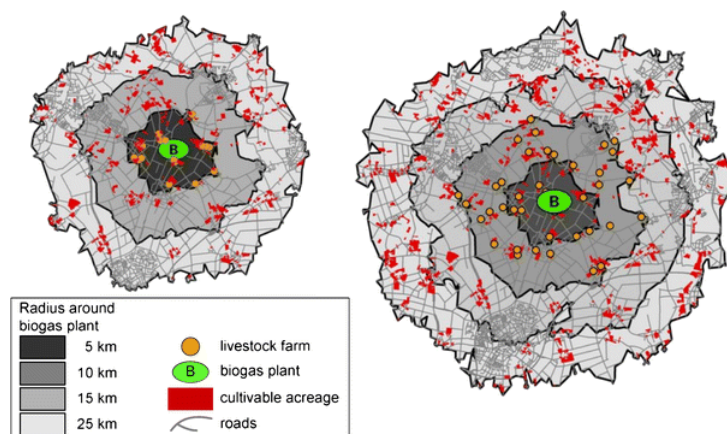


Figure 7 : Utilisation des SIG pour identifier les fournisseurs de l'usine de méthanisation et les distances par la route (Dresen and Jandewerth 2012)

Les SIG ont été récemment exploités en ACV pour l'évaluation des distances le long de réseaux au-delà de réseaux routiers. Sohnen et al. (2015) ont développé un modèle spatialisé du réseau électrique de la Californie afin d'estimer l'effet de l'introduction de voitures électriques dans le réseau existant. Cousins and Newell (2015) ont cartographié le réseau d'approvisionnement d'eau de Los Angeles dans le but d'estimer le métabolisme urbain de la fourniture d'eau. Enfin, Azapagic et al.

(2007) et Azapagic et al. (2013) ont localisé les émissions de polluants, de leurs sources (aciéries, installation de traitement d'eau) à leurs récepteurs pour évaluer la pollution urbaine.

3.2.2 Traitements de données SIG en agriculture

Le SIG est souvent utilisé en ACV pour spatialiser et traiter les données relatives à l'agriculture. Gasol et al. (2011) ont combiné différents types de données agronomiques spatialisées (p.ex. précipitations, climat, pente, orientation du terrain) pour déterminer les zones les plus appropriées de cultures utilisables pour la production de biomasse (Figure 8). Arodudu et al. (2014) ont, quant à eux, estimé le potentiel de production de biomasse dans les zones urbaines pour la bioénergie. Les surfaces de toiture et celles disponibles pour la culture ont été directement calculées à partir des données SIG (p.ex. surface de toiture de bâtiments publics). Les SIG sont aussi appropriés pour modéliser l'utilisation du sol dans l'espace. Geyer et al. (2010a) ont généré des scénarios de production de cultures grâce au SIG en concluant que la spatialisation de l'inventaire permet un raffinement important en ACV.

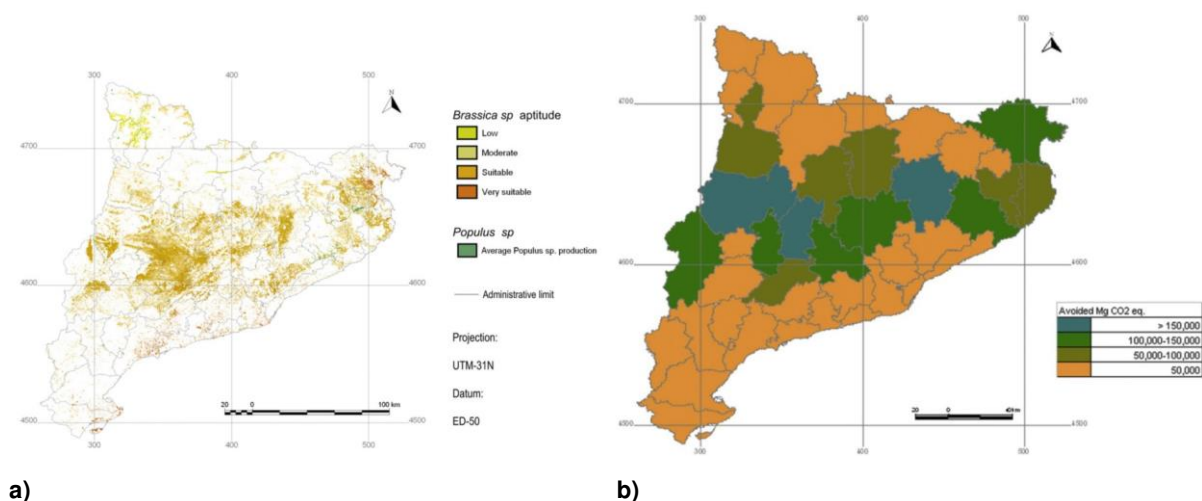


Figure 8 : a) Terre potentielle pour la culture de Brassica sp. Et Populus sp.; b) Potentiel de réduction des émissions de CO2 dans une stratégie d'implémentation des cultures pour la production d'énergie (Gasol et al., 2011)

3.2.3 Évaluation du stock de matériaux pour bâtiments et infrastructures

Le stock de matériau, à l'échelle urbaine ou plus élevée, est souvent calculé à l'aide de SIG. Nichols & Kockelman (2014) ont évalué les impacts de différents types d'agglomération urbaine. Le SIG a permis d'estimer la quantité de matériaux des bâtiments et infrastructures dans le but de quantifier l'énergie englobée. Eufrasio Espinosa and Stevenson (2013) ont calculé le nombre d'habitations à partir de données spatialisées de population pour l'analyse de l'énergie dans le cycle de vie de bâtiments d'une bio-région en centre-Amérique.

3.2.4 Problèmes d'optimisation spatiale

L'une des applications les plus avancées du SIG en ACV regarde la résolution des problèmes d'optimisation dans l'espace. Delivand et al. (2015) ont intégré le SIG avec des techniques

d'optimisation afin de déterminer la position optimale des installations pour la production de biomasse. Le SIG permet d'abord de déterminer les terres disponibles et appropriées pour la production de biomasse. Ensuite, l'information géographique est intégrée avec une analyse multicritères pour minimiser la somme des distances entre un groupe de sources de biomasse et l'installation (Figure 9).

Enfin, Saner et al. (2014) ont analysé la fourniture optimale d'énergie des bâtiments pour une municipalité entière en Suisse. Dans leur approche, il est possible d'introduire des contraintes locales affectant la fourniture d'énergie, par exemple la présence d'un réseau de chauffage urbain et l'interdiction de la géothermie dans certaines zones. Les résultats présentent les émissions de gaz à effet de serre de la municipalité avant et après optimisation (Figure 10).

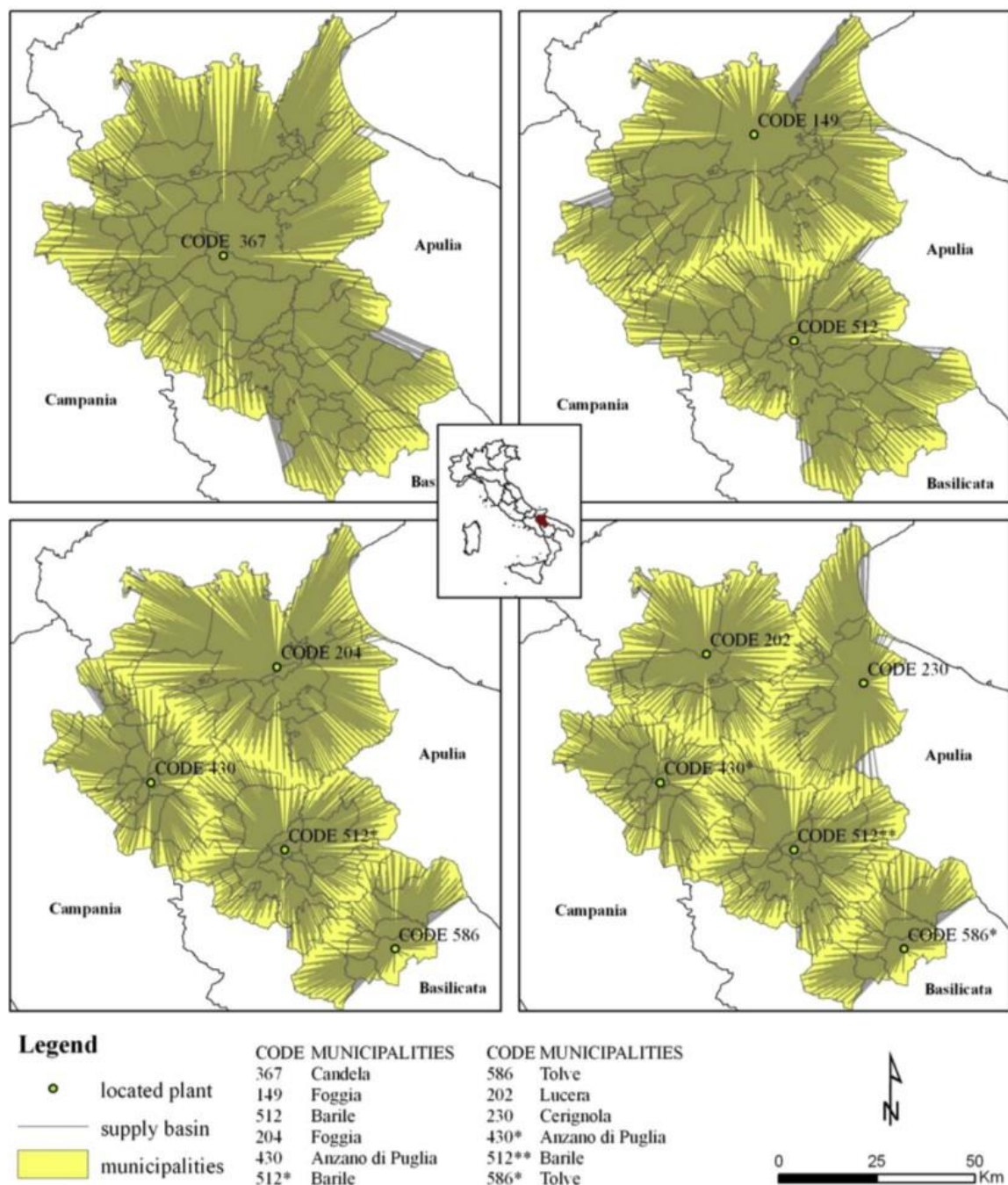


Figure 9 : Localisation optimale des installations pour traiter les biomasses et bassins de fourniture dans quatre scénarios différents (Delivand et al., 2015)

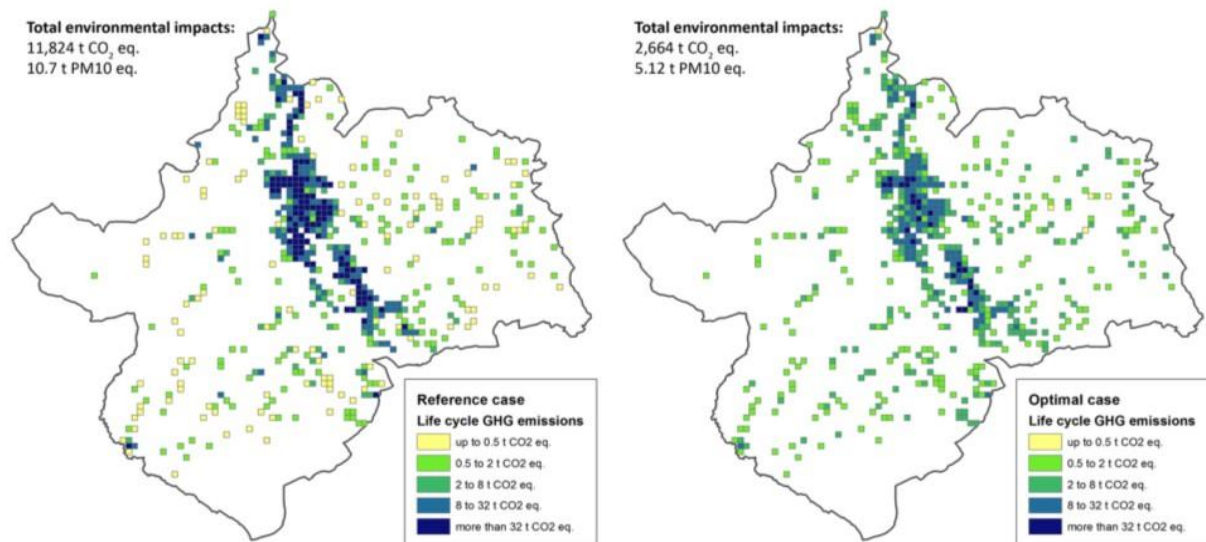


Figure 10 : Résultats pour la fourniture d'énergie des bâtiments dans une petite commune suisse pour le cas de référence (à gauche) et pour le cas optimisé par analyse multi-objective agrégés par hectare : émissions annuelles de gaz à effet serre (Adapté de Saner et al, 2014)

4 Couplage SIG et caractérisation des impacts

Nous détaillons ici les modèles d'évaluation d'impacts qui ont utilisé des systèmes SIG pour générer des facteurs de caractérisation (FCs) spatialisés. Certains travaux se sont contentés d'utiliser certaines données 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 FC) 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). Les deux types d'approches sont traités séparément dans cette section.

4.1 Utilisation de données SIG pour FCs spatialisés

4.1.1 Par région géographique

Les premiers efforts de spatialisations ont été effectués par Huijbregts et al. (2001) qui a utilisé le modèle de simulation RAINS pour calculer les potentiels d'acidification et d'eutrophisation terrestre de l'ammoniac, de l'oxyde d'azote et du dioxyde de soufre. Le modèle RAINS calcule la déposition totale des composés azotés et sulfurés au niveau des mailles européennes avec des matrices de transfert (entre mailles d'émission et de réception). Les FCs sont différenciés pour 44 régions d'Europe, grâce à une pondération des résultats par maille sur la surface des régions considérées.

Les FCs pour l'acidification de Huijbregts et al (2001) ont été intégrés dans la méthode EDIP2003 (Hauschild & Potting, 2005) qui a consacré des efforts pour spatialiser l'évaluation des impacts par

rapport à la version précédente EDIP97. Dans ce cadre, les développeurs ont également utilisé des données SIG pour la spatialisation des FCs d'eutrophisation et de toxicité humaine. Dans le premier cas, le modèle de transport CARMEN quantifie à l'échelle de la maille le changement de concentrations en nutriments dans les eaux souterraines, de surface et côtières induit par des émissions de nutriments. Les résultats correspondent à des FCs pour 32 régions européennes. Enfin, pour la toxicité humaine, le modèle géoréférencé EUTREND décrit le mélange du panache avec l'air environnant après qu'une substance soit émise et détermine l'augmentation de concentration au niveau du sol en fonction de la hauteur d'émission. Les FCs sont calculés pour quatre zones climatiques européennes : climat maritime (approximé avec les conditions atmosphériques des Pays-Bas), Europe du Nord (Finlande), Europe Centrale (Autriche) et Europe du Sud (Italie).

4.1.2 Par archétype

La différenciation spatiale peut également se faire pour des archétypes (catégorisation selon les conditions spatiales mais ne correspondant pas à une zone géographique particulière). Ainsi, dans Núñez et al. (2010), le risque de désertification lié à l'utilisation de terres est caractérisé pour 15 types de régions biogéographiques du monde (p.ex. continental chaud, méditerranéen ou tropical). Les données pour calculer les impacts d'aridité, d'érosion, de surexploitation d'aquifère et de risque d'incendie (contribuant à la désertification) proviennent de cartes ou données statistiques (p.ex. cartes des Zones Agro écologiques⁵ ou de l'Evaluation Globale de Dégradation de Sols induite par les Humains⁶). Les logiciels MarMon® 6.1 et ArcView 3.2® ont été utilisés pour superposer, moyenniser et sommer les quatre types d'impacts sur les régions biogéographiques définies.

Humbert et al. (2011) ont interprété des données de densités de population via une analyse SIG pour déterminer des densités de populations par continent. Ces dernières sont prises en compte pour le calcul de facteurs d'absorption de la pollution particulaire par la population humaine. Les facteurs sont ainsi différenciés pour cinq archétypes : intérieur, urbain, rural, site isolé et lieu inconnu.

Enfin, Brandão & Milà i Canals (2013) spatialisent les facteurs de caractérisation d'occupation et transformation de terres pour 10 différents types de régions climatiques (p.ex. tropical humide, boréal sec). Les auteurs utilisent ici le SIG pour répartir les types de sol selon les régions climatiques définies.

4.2 Génération de FCs géoréférencés

Plusieurs praticiens en ACV ont développé des FCs traduits sous forme de données SIG. Les travaux sont ici regroupés par type d'impact étudié : eutrophisation, acidification, toxicité, utilisation des terres, utilisation de l'eau et bruit. Enfin, la méthode IMPACT World+ ayant pour objectif de générer des FCs géoréférencés pour plusieurs catégories d'impact est décrite.

⁵ <http://www.fao.org/nr/gaez/fr/>

⁶ <http://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod>

4.2.1 Eutrophisation

Helmes et al. (2012) se concentrent sur la détermination des facteurs de devenir (« fate factors ») pour la caractérisation de l'eutrophisation dans le monde. Un maillage (à partir du logiciel ArcGIS) pour les phénomènes d'advection, de rétention du phosphore et d'utilisation de l'eau est alors utilisé pour obtenir une carte des facteurs de devenir avec une résolution d'un demi-degré (visualisée dans la Figure 11 mais fichiers SIG non disponibles), qui sont également moyennés pour chaque pays (tableau des facteurs pour les 168 pays disponible en annexe). Le modèle considère le transport d'eau et de phosphore d'une cellule à une autre, ainsi que le cycle de l'eau et des sédiments agissant sur l'élimination et la rétention du phosphore dans chaque cellule.

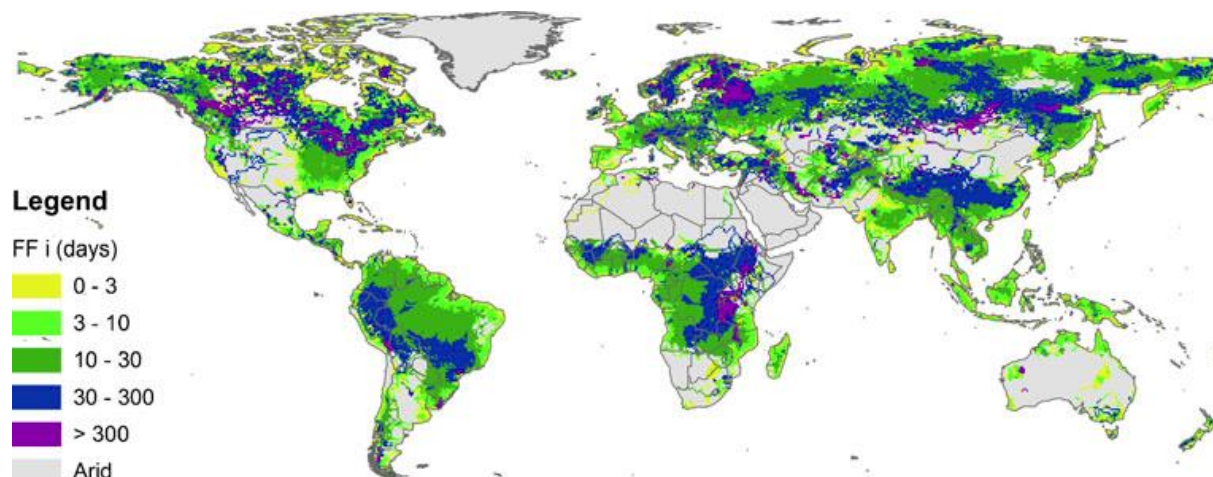


Figure 11 : Facteurs de devenir (« fate factors » - FFi) cumulés pour les émissions de phosphore dans les eaux douces avec une résolution d'un demi-degré

En combinant ces facteurs de devenir avec des facteurs d'effet à l'échelle de la maille, Azevedo et al. (2013) développent des facteurs de caractérisation d'eutrophisation pour l'Europe avec une résolution d'un demi-degré (Figure 12). Plusieurs facteurs d'effet sont testés, déterminés à partir des concentrations en phosphore dans les courants d'eau enregistrés par l'Agence européenne pour l'environnement (EEA)⁷ et traduites en valeurs pour les mailles du modèle. Les FCs sont également moyennés pour les bassins versants européens (91 au total). Les résultats ne sont pas disponibles sous format SIG.

⁷ <http://water.europa.eu/>

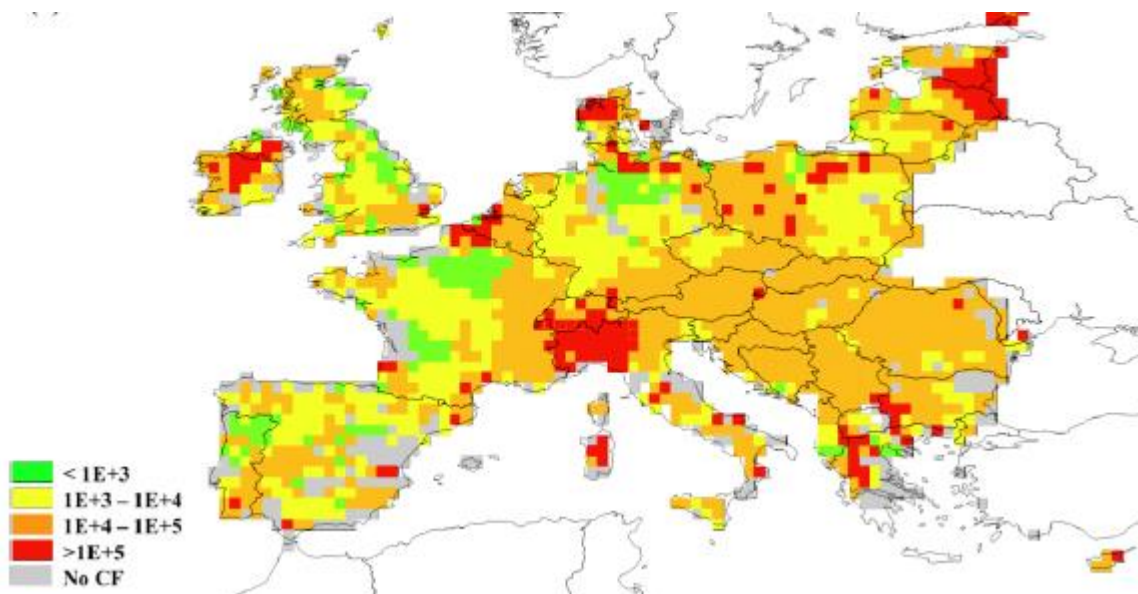


Figure 12 : FCs par maille (en $\text{day.kg P}^{-1}.\text{m}^3$) pour les lacs déterminés avec les facteurs d'effet marginaux

4.2.2 Acidification

Dans Roy et al. (2014), des FCS pour l'acidification aquatique sont développés avec une résolution de $2 \times 2,5$ degré du monde, et également agrégés à l'échelle des pays et continents. Les facteurs de devenir des émissions dans l'air de Roy et al. (2012a) sont utilisés. Plusieurs modèles et données SIG interviennent dans le calcul des FCs (p.ex. GESO-Chem, WorldClim database, PROFILE, etc.). A partir du logiciel ArcMap 9.3, les cartes de la Figure 13 sont obtenues. Les auteurs ne fournissent pas les FCs sous format SIG.

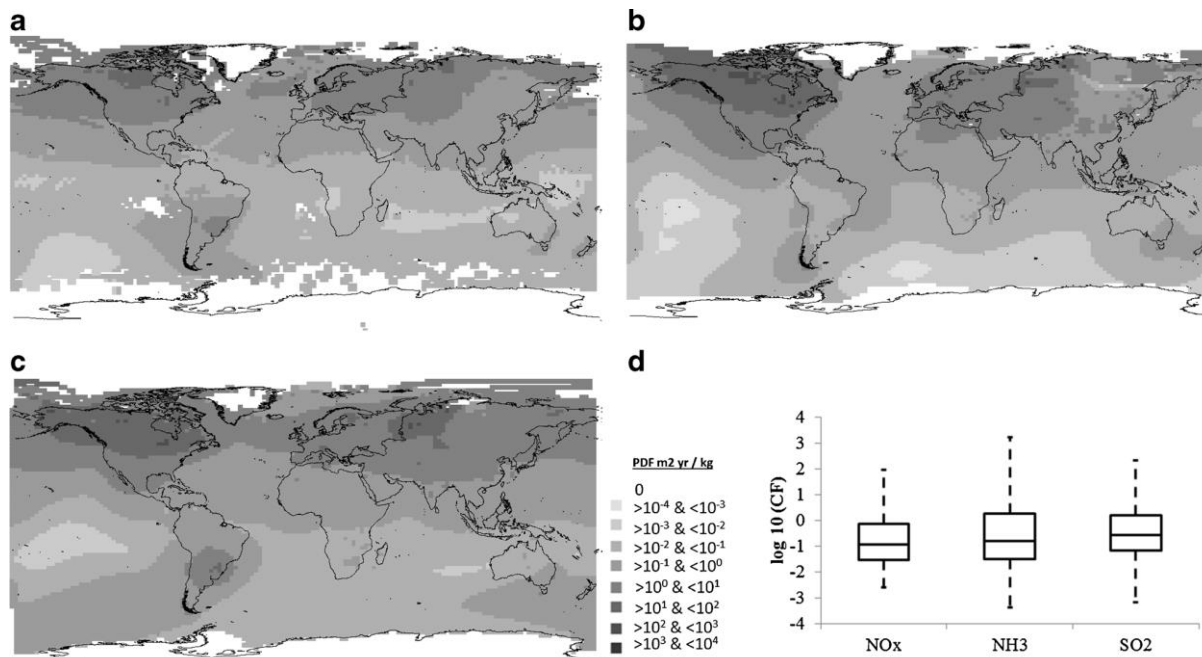


Figure 13 : FCs pour l'acidification aquatique à $2 \times 2,5$ degré pour des émissions de a) NOx, b) NH3 et c) SO2. d) Boîte à moustache des distributions des 13104 FCs calculés.

Roy et al. (2012b) se sont concentrés sur les facteurs de sensibilité de l'environnement pour l'acidification terrestre (capacité du sol à résister au changement induit par la déposition d'un polluant). Ils sont définis avec une résolution de 2 x 2,5 degré du monde. Des données SIG similaires à Roy et al. (2014) sont utilisées. Les résultats obtenus grâce au modèle de sols géoréférencé PROFILE sont présentés sous forme de cartes.

4.2.3 Toxicité

A ce jour, des facteurs de caractérisation d'écotoxicité et de toxicité humaine géoréférencés ne sont pas disponibles, même si la méthode consensus USEtox (Rosenbaum et al., 2008) permet de régionaliser les FCs à partir des caractéristiques locales (p.ex. précipitation, volumes des différents compartiments de l'environnement). Cependant, des auteurs ont utilisé le SIG pour des composantes des FCs : taux d'élimination des substances chimiques dans l'air (Sala et al., 2011) et facteurs de devenir et d'absorption pour une émission en eau douce (Kounina et al., 2014). Sala et al. (2011) utilisent le modèle géoréférencé MAPPE qui calcule le comportement d'une substance chimique dans un environnement multimedia (divisé en compartiments) en considérant un régime permanent et une résolution d'un degré du monde entier. Les cartes de taux d'élimination pour plusieurs substances sont montrées en annexe et les résultats sont comparés avec les valeurs génériques de USEtox. Dans Kounina et al. (2014), deux types de calculs sont effectués pour les facteurs de devenir et d'absorption. Tout d'abord les auteurs adaptent les paramètres du modèle IMPACT World pour définir 17 zones géographiques dans le monde à partir de données SIG (p.ex. population, taux de précipitation). Ils comparent ces résultats avec le modèle géoréférencé IMPACT Europe (résolution 2 x 2,5 degré), pour lequel ils développent également des archétypes pour les bassins versants. Seuls des tableaux de valeurs sont présentés dans le papier.

4.2.4 Utilisation des terres

Les impacts liés à l'utilisation des terres ont également fait l'objet de plusieurs travaux de spatialisation du fait de leur caractère local. Dans de Baan et al. (2013), des données SIG (cartes d'utilisation de terres LADA et Anthromes) sont utilisées pour développer des facteurs de caractérisation d'utilisation des terres (occupation, transformation et permanent) sur l'extinction des espèces. Les résultats sont présentés sous forme de carte pour les différentes écorégions du monde et sous forme de tableau (avec les incertitudes associées). Cependant, les auteurs ne fournissent pas des fichiers SIG directement utilisables et la résolution des résultats est inconnue.

Cao et al. (2015) ont quant à eux exprimé les impacts d'utilisation de terres via six différents potentiels (potentiel de production biotique à partir de Brandão & Milà i Canals, 2013 ; potentiel de régulation du climat à partir de Müller-Wenk & Brandão, 2010 ; et potentiel de résistance à l'érosion, potentiel de purification physico-chimique et mécanique de l'eau et potentiel de régulation des eaux douces à partir de Saad et al., 2013) qu'ils ont ensuite monétarisés. Les FCs sont exprimés pour 209 pays du monde. Plusieurs données SIG sont prises en compte (p.ex. contenu carbone des terres arables, extraction des eaux souterraines). Les couches SIG obtenues sont visibles sous forme de carte en annexe mais pas les fichiers opérationnels.

Enfin, Núñez et al. (2013) se sont focalisés sur les impacts d'érosion des sols sur les points finaux d'épuisement des ressources et de qualité des écosystèmes. A partir de données SIG (p.ex. information sur les sols de HWSD – voir section 1.4), les FCs ont été calculés pour le monde avec une résolution d'environ 10 x 10 km² (Figure 14). Les couches SIG (coordonnées des points en fichier .txt) sont disponibles en annexe.

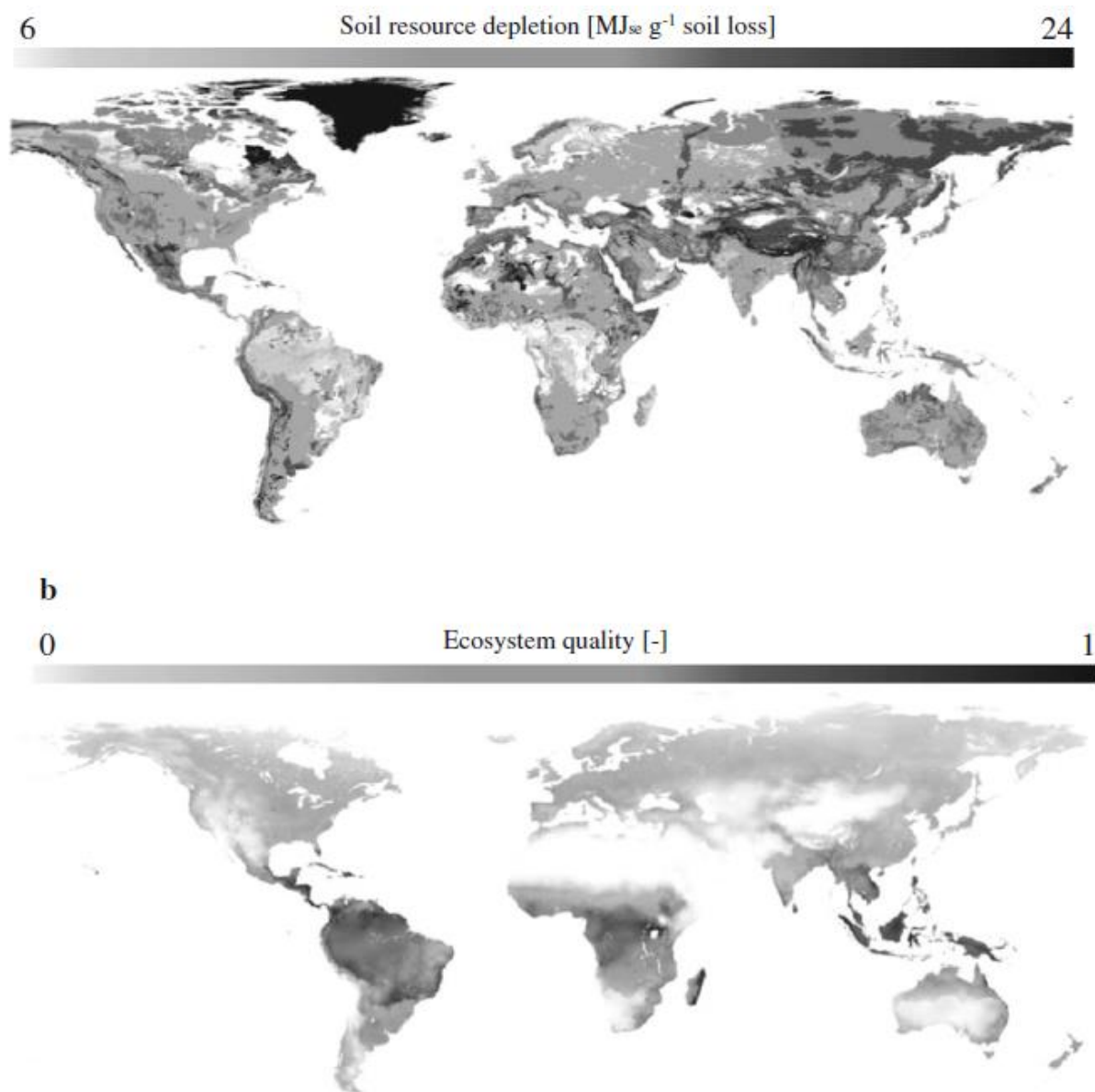


Figure 14 : FCs pour l'épuisement des ressources (a) et la qualité des écosystèmes (b)

4.2.5 Utilisation de l'eau

Pfister et al. (2009) ont développé des facteurs de caractérisation du stress hydrique ainsi que ceux associés pour les dommages sur la santé humaine, les écosystèmes et les ressources. Les FCs sont valables pour le monde avec une résolution spatiale d'un demi-degré (Figure 15), et aussi présentés à l'échelle des pays ou des bassins versants dans des tableaux. Des données SIG (p.ex. niveaux de précipitation de la base de données CRU TS) et le modèle géoréférencé WaterGAP 2 ont été utilisés. Les résultats sont disponibles sous forme de coordonnées SIG (fichier .txt) en annexe.

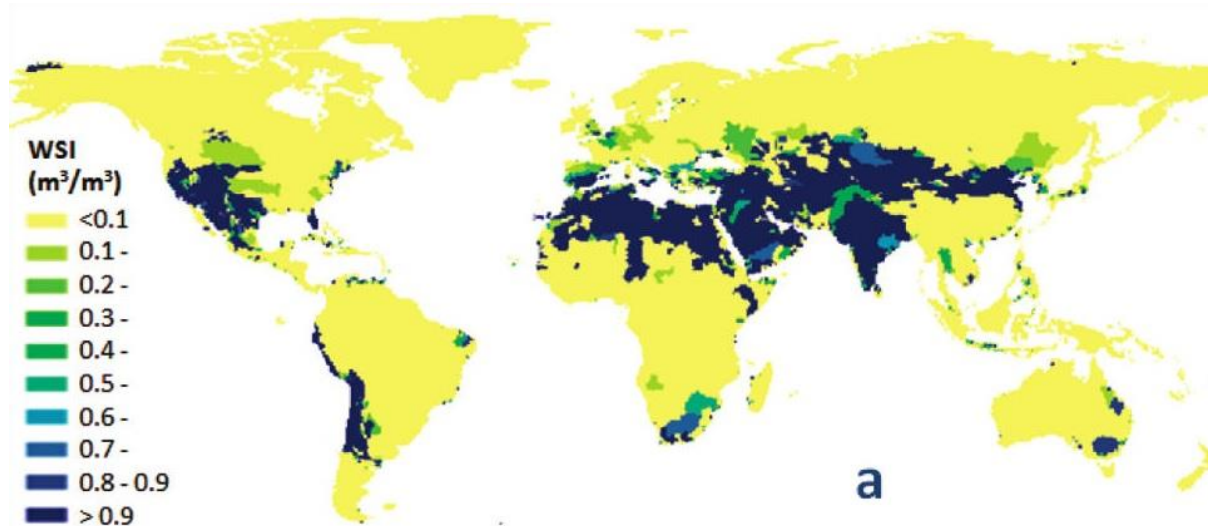


Figure 15 : CFs pour l'indice de stress hydrique au niveau des bassins versants du monde

Les travaux de Pfister et al. (2009) ont été adaptés dans deux autres publications. Tout d'abord, dans Núñez et al. (2015), les FCs ont été affinés pour des divisions de bassin versant en Espagne. Les modèles WaterGAP 2 et SIMPA ont permis de modéliser la disponibilité et l'utilisation de l'eau dans les bassins versants ainsi que le cycle hydrologique. Les fichiers Shapefile générés sont disponibles en annexe (résolution de 1 km^2). Puis, Scherer et al. (2015) ont adapté la méthode de Pfister et al. (2009) pour calculer le stress hydrique sur le Mississippi, à partir du modèle hydrologique SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Les résultats, calculés avec le logiciel ArcGIS pour une résolution de 0.125 degré, sont fournis sous format Shapefile.

Dans Boulay et al. (2011), les impacts de l'utilisation de l'eau douce sont également caractérisés mais avec une approche différente, basée sur la capacité d'adaptation des autres utilisateurs de la ressource en eau. La régionalisation des FCs est effectuée par bassin versant du monde (808 mailles d'une résolution d'un demi-degré à une résolution par pays) grâce au logiciel ArcGIS et au modèle WaterGAP 2. Les auteurs fournissent les résultats sous forme de cartes et de tableau, mais pas de fichier SIG.

Van Zelm et al. (2011) se sont quant à eux focalisés sur les impacts de l'extraction des eaux souterraines sur les espèces de végétation terrestre. Les FCs sont développés pour les Pays-Bas à partir des modèles géoréférencés NHI (National Hydrological Instrumentation) et MODFLOW. Seule une visualisation des résultats est mise à disposition.

Enfin, des FCs caractérisant les impacts liés à l'utilisation de l'eau de mer ont été générés dans Langlois et al. (2015). En particulier, les auteurs s'intéressent aux conséquences dues à l'ombrage d'une structure opaque flottant à la surface de la mer. Pour cela, des données SIG (productivité primaire nette des océans - NPP⁸) sont utilisées. Les résultats sont présentés sur une carte (résolution inconnue, Figure 16) mais ne sont pas disponibles en tant que fichier SIG.

⁸ <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/custom.php>

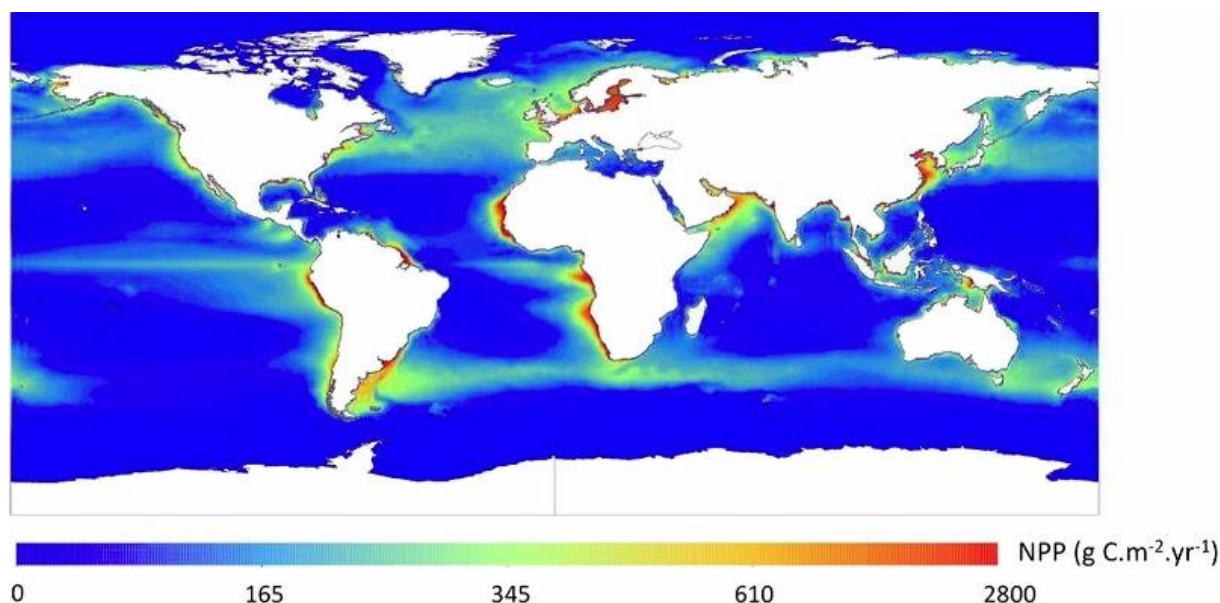


Figure 16 : FCs pour les impacts dus à l'ombrage des eaux de mer

4.2.6 Bruit

Les impacts liés aux émissions de sons ont été étudiés par Cucurachi & Heijungs (2014). Des nouveaux FCs sont développés à partir de données SIG (p.ex. carte de couverture terrestre de la base de données CORINE) et du logiciel ArcGIS pour l'Europe avec une résolution de 10 km². Les auteurs mettent à dispositions les couches obtenues sous format raster (.tif), ainsi que les valeurs moyennes par archétype (selon la fréquence, le moment et le lieu d'émission).

4.2.7 IMPACT World+™

Plusieurs experts ACV se sont associés pour développer une nouvelle méthode d'évaluation des impacts appelée IMPACT World+⁹. Celle-ci a pour but de régionaliser la caractérisation des impacts pour le monde entier et de fournir des informations sur leurs incertitudes. La régionalisation des FCs, à l'échelle du monde, des continents, des pays mais aussi de la maille (résolution d'un demi-degré), est considérée pour les effets respiratoires (à partir de Humbert et al., 2011), la toxicité humaine et l'écotoxicité (à partir du modèle USEtox), les radiations ionisantes, l'utilisation de l'eau (Boulay et al., 2011), l'acidification (Roy et al., 2012a, 2012b, 2014), l'eutrophisation (Helmes et al., 2012) et l'utilisation des terres (Saad et al., 2013 ; Cao et al., 2015). Pour l'instant, seule la catégorie d'utilisation de l'eau est implémentée de façon opérationnelle. Un fichier SIG est disponible sur le site web¹⁰.

⁹ <http://www.impactworldplus.org/en/>

¹⁰ <http://www.ciraig.org/fr/wateruseimpacts.php>

5 Utilisation du SIG pour une évaluation complète

Dans cette section, nous allons citer les études qui se sont intéressées à une intégration de modèles SIG pour l'inventaire et pour la caractérisation des impacts. Cet exercice est en fait effectué rarement 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 (p.ex. Gasol et al., 2011 ; Saner et al., 2014). De plus, les articles ayant développé des FCs géoréférencés sont relativement récents (surtout depuis les quatre dernières années) et pour certaines catégories, seul un composant du FC est analysé (p.ex. facteur de devenir pour la toxicité). Enfin, des articles s'appuient sur des FCs spatialisés en fonction la zone géographique étudiée, en utilisant les tableaux de FCs par région sans avoir recours à des outils SIG.

Dans la littérature, Bengtsson et al. (1998) et Wei & Carlson (2003) sont parmi les premiers à avoir conceptualisé un modèle de données SIG pour l'ACV. Leur modèle vise à représenter trois sous-systèmes de l'ACV (Figure 17): le sous-système technique (données d'inventaire), environnemental (impacts sur l'environnement) et social (pondération des impacts en fonction des perspectives culturelles). La superposition de ces trois couches résulte en la détermination des impacts sur l'environnement sur le groupe de population considéré.

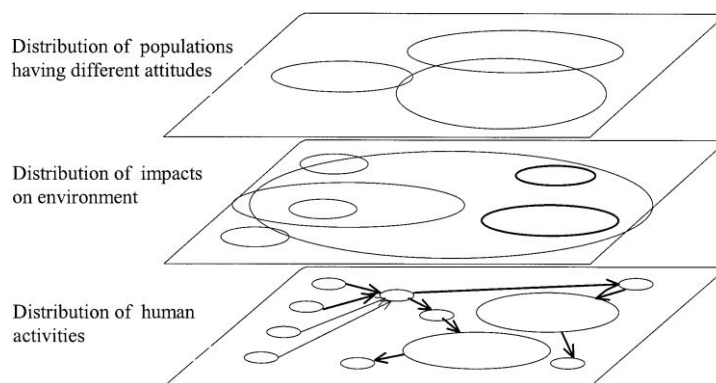


Figure 17 : Les trois sous-systèmes en ACV (technique, environnemental et social) représentés comme couches SIG (Bengtsson et al, 1998).

Les études plus concrètes ayant utilisé le SIG à la fois pour les données d'inventaire et pour l'évaluation des impacts se sont focalisées sur le secteur de l'agriculture. Tout d'abord, Pfister et al. (2011) ont évalué les impacts sur les ressources en eau et en terres de 160 cultures dans le monde. Les données de consommation d'eau et d'utilisation des terres sont calculées avec une résolution de 5 arc-minutes à partir des rendements de culture (données statistiques et de télédétection) et des besoins en eau (modèle CROPWAT). Les FCs du stress hydrique sont extraits de Pfister et al. (2009) tandis que des nouveaux indicateurs de stress sur les terres sont développés à partir de données SIG de production primaire nette de la végétation. Les résultats d'impacts sont présentés sous forme de cartes.

Rodriguez et al. (2014) évaluent l'impact environnemental de la production de maïs aux Etats-Unis. Pour cela, les auteurs ont développé un éditeur KML dans OpenLCA pour spatialiser l'ICV, ainsi que la caractérisation d'utilisation des terres (Kier et al., 2005) et de consommation d'eau douce (Treez Ltd, 2014 ; Pfister et al., 2009) à partir de fichiers Shapefiles. Les calculs sont effectués grâce à la librairie Java GeoTools.

Enfin, Nitschelm et al. (2014) et Unamunzaga et al. (2014) présentent les concepts pour l'évaluation de territoire agricole et de cultures en Espagne, respectivement. Dans les deux cas, des données SIG sont utilisées pour l'inventaire (p.ex. caractéristiques des sols) et pour les FCs (p.ex. utili-

sation d'eau de Núñez et al., 2013). Cependant, les cas d'étude sont en cours de développement et aucun résultat n'est présenté.

6 Logiciels et bases de données d'ACV

6.1 Logiciels d'ACV

Simapro (<http://www.pre-sustainability.com>) est édité par le cabinet néerlandais PRé. Il peut importer des fichiers CSV (format spécifique à Simapro) et Ecospold v1 et peut exporter sous ces même format ainsi qu'aux formats Excel et *.txt. Simapro ne possède pas de fonction permettant de manipuler des données SIG ni de fonctions de scriptage.

GaBi (<http://www.gabi-software.com/deutsch/index/>) est édité par le cabinet allemand thinkstep (ex. P.E. International). Le logiciel peut importer des données aux formats propriétaires GaBi (*.gbx ou *.gpr), ainsi qu'aux formats ILCD et Ecospold v1. Aucune fonction de scriptage ou de SIG n'est disponible. GaBi est spécifiquement conçu pour fonctionner avec ses bases de données ACV dédiées mais peut aussi des bases de données tierces telles ecoinvent.

Umberto (<http://www.umberto.de/en/>) est édité par IFU Hamburg. Il possède des fonctions de scriptage en langage Python, ce qui permet théoriquement d'effectuer des fonctions de traitement de données SIG ou d'interagir avec des logiciels SIG. Cela requiert cependant des efforts supplémentaires avancés (nécessitant l'appui d'un informaticien) et une compréhension de l'interface COM du logiciel. Les modèles Umberto ont leur propres format (*.umberto) qui supportent les données Ecospold v1 et v2.

OpenLCA (<http://www.openlca.org/>) est un logiciel libre édité par le cabinet allemand GreenDelta. Il peut théoriquement utiliser toutes les bases de données ACV existantes via son module d'importation Nexus et son format propre *.zolca. Il est aussi possible d'importer des fichiers Ecospold v1 et v2, Excel, ILCD et CSV (simapro). OpenLCA permet de référencer les coordonnées géographiques d'un procédé d'inventaire. Les développeurs travaillent actuellement sur l'implémentation de méthodes d'évaluation d'impact spatialisées. Si les lieux des procédés utilisés dans l'ICV sont renseignés (en utilisant le codage tel que défini dans la base de données ecoinvent), OpenLCA peut afficher la contribution de chaque région au score final sur une carte, via la fonction « Locations ». Cette fonction utilise l'API développée par Google.

CMLCA (<http://www.cmlca.eu/>) est un logiciel gratuit (mais pas open-source) développé par l'Université de Leiden (Reinout Heijungs). Les fichiers de type ASCII (délimité par tabulation), EcoSpold, ILCD et Exiobase sont supportés par la fonction d'import. Le logiciel ne possède pas de fonction permettant de manipuler des données SIG ni de fonctions de scriptage.

Brightway2 (<http://brightwaylca.org/>) est une suite de bibliothèques écrite en langage Python et permettant d'effectuer des calculs d'ACV avancés. Brightway est fourni par Chris Mutel (Swiss National Science Foundation / ETH Zürich) sous licence BSD (*Berkeley Software Distribution*) et peut donc être librement modifié. De base, Brightway2 peut importer des fichiers aux formats Ecospold v1 et v2 ainsi qu'ILCD et Simapro CSV. Néanmoins, de par la nature ouverte de Brightway2, il est techniquement possible d'importer et d'exporter sous tous les formats supportés par Python. Enfin, un plugin nommé Bw2-regionalis permet de gérer la spatialisation de l'inventaire (via des bibliothèques permettant de définir des régions de différentes échelles) et des méthodes de caractérisation des impacts ainsi que d'exporter des cartes localisant les régions contribuant à l'impact du procédé étudié.

6.2 Bases de données ACV

Les principales bases de données utilisées en ACV sont ecoinvent, GaBi, ökobau, ELCD.

L'objectif ici est d'étudier les possibilités offertes par ces bases de données pour un couplage avec les SIG. Toutes ces bases de données possèdent des inventaires régionalisés, dans le sens où le lieu ou la région où se déroulent les procédés sont systématiquement mentionnés. Néanmoins, la majorité des procédés sont localisés en Europe où mondiaux. Ainsi, par exemple, sur les 4 087 procédés que contient la base ecoinvent 2.2, 1295 sont des procédés européens (RER) et 367 sont mondiaux (GLO), soit 41% de la base de données.

Seule ecoinvent 3, via le format ecospold2, contient des données exploitables par un SIG. En effet, contrairement aux autres formats utilisés, ecospold2 permet dorénavant de stocker des coordonnées géographiques associées à des activités. Néanmoins, cette fonction est pour le moment peu utilisée. La balise permettant de stocker des informations géographiques dans ecospold2 se nomme simplement *geography*. Une nouvelle géographie ecospold 2 peut être créée via l'application web : <http://geography.ecoinvent.org/>.

Les formats ecospold1 ainsi qu'ILCD permettent seulement de stocker le code ISO de la région ou du pays où se produit l'activité (avec une seule région possible). Par ailleurs, les fichiers propriétaires utilisés par GaBi ou Simapro ne permettent pas non plus de stocker des informations géographiques plus détaillées. Enfin, aucun de ces formats ne répond aux critères de l'Open Geospatial Consortium, ce qui ne facilite pas l'opérabilité entre ACV et SIG à court et moyen terme.

6.3 Résumé

	Brightway2	CMLCA	GaBi	OpenLCA	Simapro	Umberto
Licence	BSD	Propriétaire	Propriétaire	MPL 2.0	Propriétaire	Propriétaire
Formats d'import	Tous les formats gérés par Python.	*.txt, ecospold v1 et v2, *.xml	*.gbx, *.gbr, ilcd, ecospold v1	*.zolca, *.csv, excel, ecospold v1 et v2	*.csv (format Simapro), ecospold v1	*.umberto, ecospold v1 et v2
Formats d'export	Tous les formats gérés par Python.	*.txt, ecospold v1 et v2, *.xml	*.gbx, *.gbr, ILCD, epd, ecospold v1	*.zolca, *.csv, excel, ecospold v1 et v2	*.csv, *.txt, *.xls, *.xlsx, ecospold	*.umberto
Visualisation SIG	Oui	Non	Non	Oui, basique	Non	Non
Scriptage	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui
ICV spatialisé	Par région et coordonnées géographiques	Par région	Par région	Par région et coordonnées géographiques	Par région	Par région
LCIA spatialisé	Oui	Non	Non	En cours	Non	Non

7 Conclusion

Cette partie permet dans un premier temps de connaître les bases théoriques des SIG. A partir des principes de cartographie, le système de coordonnées définit l'emplacement d'un point sur le globe et les projections permettent de passer du globe à une surface plane. Les SIG servent principalement à manipuler et visualiser des données qui peuvent être stockées sous formes de couches vectorielles (coordonnées géographiques de formes et données alphanumériques), de couches raster (images avec une résolution spatiale fixée) ou de simples tableaux. La manipulation de ces couches peut être facilitée par l'emploi du langage SQL. Les formats de données sont nombreux, mais l'Open Geospatial Consortium (OGC) et la directive INSPIRE définissent des standards à suivre pour faciliter l'interopérabilité. À noter que certains formats de référence, tels que shapefile, sont très utilisés sans pour autant être conformes aux recommandations de l'OGC. Les logiciels et bases de données de SIG existants sont nombreux et il est possible d'utiliser des solutions libres, telles que les logiciels Grass ou QGIS, ou les données socio-économiques SEDAC ou OpenStreetMap.

La revue des travaux utilisant le SIG pour spatialiser l'inventaire du cycle de vie renseigne sur les différents degrés de complexité de couplage et les principaux secteurs d'application. En effet, les outils SIG peuvent être utilisés pour extraire des informations géolocalisées existantes prises en compte dans le calcul de données d'inventaire, mais également pour effectuer des opérations à partir des couches SIG, telles que le calcul de distance ou de surface, afin de créer de nouvelles données spatialisées spécifiques au cas d'étude. Différents niveaux d'interaction entre les outils SIG et ACV ont été observés, de l'absence de couplage (échange d'informations manuel) à un couplage fort (communication automatique entre les deux outils). Ce dernier type d'interaction permet notamment de résoudre des problèmes d'optimisation spatiale, p.ex. la détermination de la distance minimale entre source et production de biomasse ou du meilleur réseau de fourniture d'énergie d'une ville. Les études revues, datant d'après 2010, sont appliquées pour les secteurs de l'agriculture, des transports et logistique, des systèmes territoriaux, des infrastructures et de l'énergie, pour lesquels les outils SIG permettent un affinement des données d'inventaire (p.ex. identification des routes de transport, réseau d'approvisionnement d'eau, caractéristiques climatiques et démographiques d'une région, etc.).

La spatialisation de la caractérisation des impacts peut s'avérer importante pour des catégories sensibles à la variabilité spatiale. Des données (p.ex. densité de population, concentration en phosphore dans les courants d'eau) ou des modèles SIG (p.ex. RAINS pour le calcul de déposition de composés azotés, PROFILE pour la modélisation des sols) ont alors été utilisés pour construire des facteurs différenciés par région géographique ou par archétype, mais aussi pour générer des facteurs géoréférencés sous forme de couche SIG. La différenciation spatiale, effectuée depuis le début des années 2000, résulte en un tableau de valeurs facilement utilisable pour adapter la caractérisation des impacts au contexte locale de l'étude, tandis que la génération de couche, mise en place depuis 2009, permet une résolution plus fine des FCs et le couplage avec des données d'inventaire géoréférencées. Cette dernière technique a été utilisée pour l'eutrophisation, l'acidification, la toxicité, l'utilisation des terres, l'utilisation d'eau et le bruit. La méthode IMPACT World+ en cours de développement a pour objectif de caractériser les effets locaux pour plusieurs de ces catégories, à l'échelle du monde, des continents, des pays et de la maille (résolution d'un demi-degré).

Que ce soit pour l'étape d'inventaire ou d'évaluation des impacts, le SIG représente un outil intéressant pour la communication des résultats, via la visualisation de cartes d'émission, d'échelle de couleurs d'impact ou autres. Peu d'études ont couplé le SIG avec l'ACV pour une évaluation complète, incluant des informations spatialisées pour l'inventaire et pour la caractérisation des impacts. Les exemples cités sont la plupart encore assez théoriques et se concentrent sur le secteur de l'agriculture.

Enfin, 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. Concernant les bases de données, seul le format ecospold 2 (utilisé pour ecoinvent 3) permet de stocker des coordonnées géographiques exploitables par un SIG.

Cet état de l'art montre une augmentation de l'utilisation du SIG dans la littérature ACV, qui présente un atout pour générer des données d'inventaire, différencier les impacts selon le contexte géographiques et visualiser les résultats, mais qui reste difficile dans la pratique. Cette conclusion est en accord avec l'incorporation progressive de fonctionnalités SIG dans les outils ACV.

II. Cas d'études

Objectifs :

Les cas d'étude détaillés ici servent à comprendre les différentes interactions possibles entre outils SIG et logiciels ACV. Ils permettent d'identifier les intérêts et les problèmes pratiques de ce couplage.

1 Cas d'étude n°1 : Automobile et impacts locaux → couplage fort

L'objectif est de montrer la faisabilité de coupler les outils SIG et ACV pour régionaliser l'inventaire et l'évaluation des impacts. Le système considéré représente le cycle de vie (simplifié) de l'essence utilisée comme carburant de voiture (Figure 1). L'unité fonctionnelle est l'utilisation de la voiture sur 100 km (dont 20 km en zone urbaine et 80 km en zone non-urbaine). Cette unité fonctionnelle est représentée pour 3 trajets effectués en Espagne, France et Suède (suivant une ligne droite par souci de simplification).

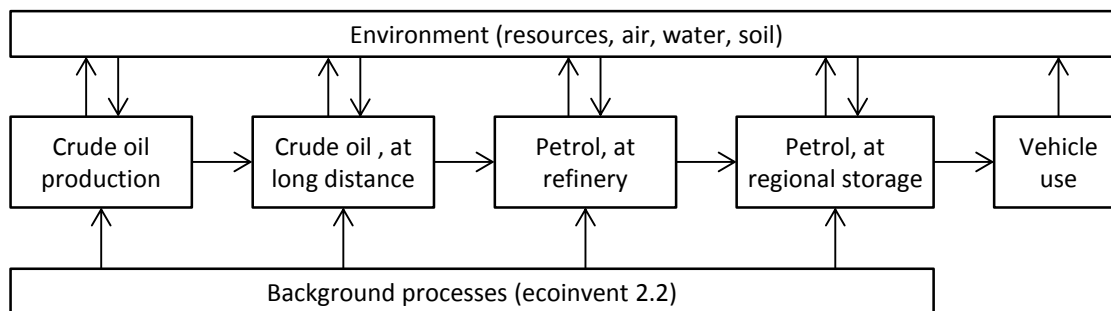


Figure 18: Frontières du système étudié

Le type de voiture pris en compte ici est de capacité 1.4-2.0 L, du segment B (citadine compact type Renault Clio IV, Peugeot 208 ou Ford Fiesta) et de norme EURO5.

1.1 Description des procédés

Le procédé « Vehicle use » a été créé pour le cas d'étude. Il comprend une seule entrée (consommation d'essence) et les émissions du pot d'échappement (monoxyde de carbone, COV, oxydes d'azote et particules fines). La consommation de carburant comprend la valeur moyenne pour le type de véhicule (5.77 L/100 km) et une consommation additionnelle liée à l'utilisation de l'air conditionné. Cette dernière dépend de la différence de température entre l'extérieur et celle souhaitée à l'intérieur de la voiture. Grâce à la régression de l'IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), la consommation additionnelle est donnée par :

$$Cons_{add} = \frac{0.160}{\rho_{gasoline}} \times (T_{out} - T_{in})$$

Avec T_{in} choisi à 21°C et $\rho_{gasoline}$ la densité énergétique de l'essence (8.67 kWh/L).

Les émissions du pot d'échappement, déterminées à l'aide des équations de COPERT¹¹, se divisent en émissions à chaud et à froid :

$$\begin{cases} Emission_{hot} = \frac{a + c \times speed + e \times speed^2}{1 + b \times speed + d \times speed^2} \times (1 - r) \\ Emission_{cold} = Emission_{hot} \times (A \times speed + B \times T_{out} + C) \end{cases}$$

Avec les coefficients a, b, c, d, e, r, A, B, C provenant de COPERT (spécifiques à chaque type d'émission et de norme EURO). Les vitesses moyennes déterminées à partir des cycles d'Artemis sont 17.6 km/h pour la zone urbaine et 77 km/h pour la zone non-urbaine (routes nationales et auto-routes).

Les autres procédés considérés dans le cycle de vie proviennent de la base de donnéesecoinvent 2.2 (« unit process »). Ils représentent des technologies européennes (« RER ») sauf pour les champs d'extraction de pétrole pour lesquels plusieurs technologies sont modélisées (« RME » pour le Moyen-Orient, « RAF » pour l'Afrique du Nord, « RU » pour la Russie, « NG » pour le Nigéria et « NO » pour la Norvège).

1.2 Utilisation du SIG

Plusieurs informations géo-spatialisées disponibles dans le domaine public peuvent être utilisées pour affiner les données d'inventaire et d'évaluation des impacts :

- Carte de champs d'extraction de pétrole, à partir de laquelle une couche représentant le barycentre par zone a été créée, et carte des raffineries (<http://www.portworld.com>)
- Carte des zones urbaines (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/grump-v1>)
- Carte de températures mensuelles (<http://www.cgiar-csi.org/data>)
- Carte des indices de stress hydrique (Pfister et al., 2009)
- Fichier Excel USEtox adaptable selon les données de « paysage » (Rosenbaum et al., 2008)

De plus, l'unité fonctionnelle pour les 3 pays choisis est représentée à l'aide d'une couche SIG, créée pour le cas d'étude.

Comme décrit précédemment, les cartes de température et de zones urbaines (déterminant la vitesse du véhicule et le type d'émission dans l'air (high/low population density)) permettent de calculer la consommation de carburant et les émissions du pot d'échappement pour le procédé « Vehicle use ». Pour une modélisation « parfaite », il faudrait suivre les valeurs tout au long du trajet effectué et donc distribuer les émissions sur cette distance. Cependant, en tant que première approche, nous avons considéré la température au point de départ de la voiture et donc représenté les émissions en ce même point.

Les couches de champs d'extraction, de raffineries et d'utilisation de la voiture peuvent être traitées par le SIG pour calculer la distance entre des points de chacune de ces couches. Les données d'inventaires ecoinvent liées au transport du pétrole peuvent ainsi être mises à jour. Il est important de noter ici que la distance effectuée entre les procédés de traitement du pétrole (p.ex. entre le champ d'extraction et la raffinerie) peuvent comporter des zones sur terre et sur mer. Grâce à un traitement SIG, il est alors possible de déterminer ces deux composantes et d'adapter l'inventaire (« onshore pipeline » et « transoceanic pipeline »).

¹¹ COPERT : Programme de calcul des émissions provenant du transport routier selon le type de véhicule et de trajet.

La carte de zones urbaines est également utilisée pour adapter les émissions dans l'air de la raffinerie selon son positionnement (high/low population density).

Concernant l'évaluation des impacts, la carte du stress hydrique permet de déterminer l'impact local des procédés de premier plan. Dans ce cas d'étude, les procédés d'extraction du pétrole et de raffineries utilisent des ressources d'eau directes. La quantité extraite peut alors être multipliée par le facteur de caractérisation correspondant à la maille du procédé.

Le modèle USEtox a lui été régionalisé pour les régions considérées : Europe (défaut), Moyen-Orient, Russie, Afrique du Nord et Centre-Afrique. Les nouveaux facteurs de caractérisation sont présentés sous forme de tableau. Ils permettent d'adapter l'évaluation des impacts toxiques des émissions liées au transport entre le champ de pétrole et la raffinerie (localisée au point du champ de pétrole par simplification).

1.3 Fonctionnement du plug-in

La démonstration est faite devant les membres SCORE LCA. Le plug-in, développé par un stagiaire informatique en environ trois semaines, fonctionne dans QGIS et interagit avec le logiciel ACV Brightway2, dans lequel l'arbre de procédés a été créé. Il permet de :

- Choisir le parcours du véhicule (Espagne, France ou Suède)
- Choisir l'origine du pétrole (RME, RAF, RU, NG ou NO)
- Choisir le mois d'utilisation (de janvier à décembre)
- Choisir la méthode d'évaluation des impacts (Water stress, USEtox ou ReCiPe)
- Calculer les impacts
- Visualiser les résultats sur la carte (analyse de contribution ou comparaison d'utilisation)

1.4 Présentation des résultats

Les résultats des Figures 1, 2 et 3 ont été présentés lors de la réunion intermédiaire aux membres SCORE LCA. On peut y voir le plug-in dans lequel l'utilisateur choisit le point d'extraction du pétrole et le trajet de la voiture. La carte montre alors le trajet le plus court entre le champ de pétrole, la raffinerie et la station essence. Enfin, les résultats sont affichés sur la carte avec une échelle de couleur selon la contribution. Pour la toxicité humaine, ce sont les émissions de la raffinerie qui dominent l'impact, tandis que le stress hydrique est bien plus important au champ de pétrole. Pour ReCiPe, les trois trajets (Espagne, France et Suède) sont comparés en choisissant comme point d'extraction de pétrole le principal fournisseur de chacun des pays (Russie pour Suède, Moyen Orient pour France et Nigéria pour Espagne). Le mix moyen pourrait également être modélisé. De très faibles différences d'impacts (moins de 5%) sont observées entre les trois scénarios.

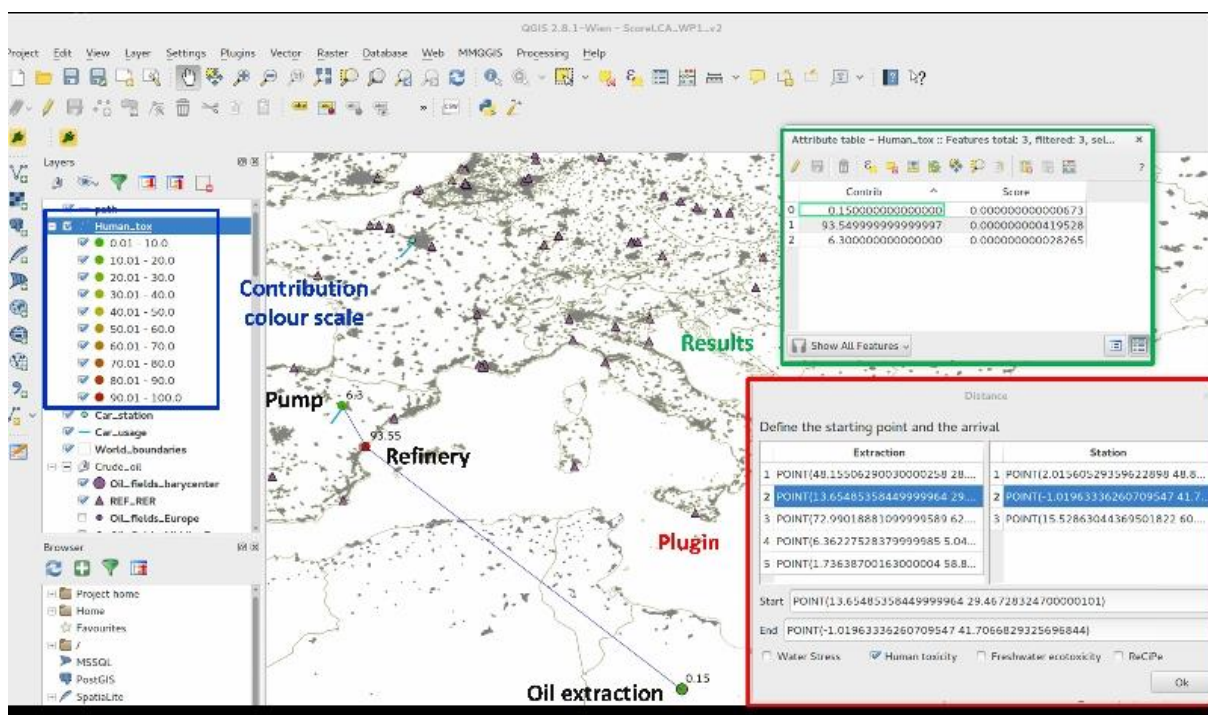


Figure 19: Résultats du plug-in pour la toxicité humaine

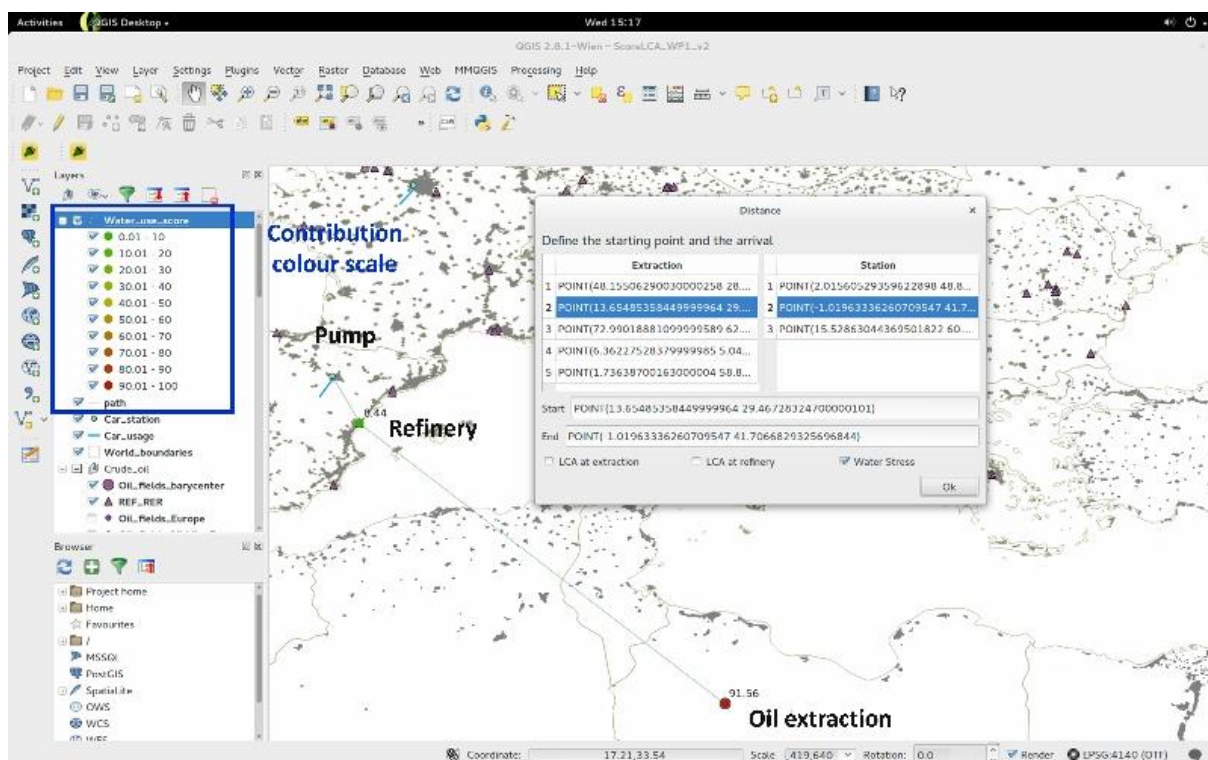


Figure 20: Résultats du plug-in pour le stress hydrique.

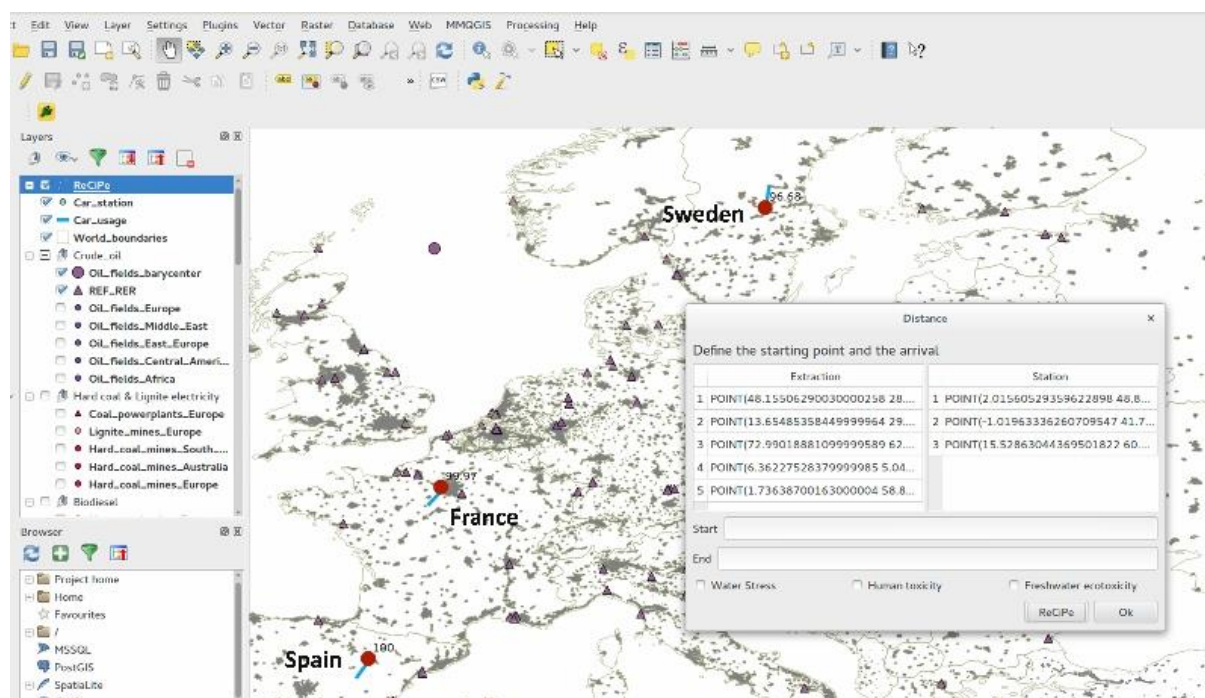


Figure 21: Résultats du plug-in pour ReCiPe (comparaison des trois scénarios)

1.5 Conclusions

Pour ce cas d'étude, le couplage fort entre l'ACV et SIG grâce au plug-in 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
- Automatiser l'échange de données entre les outils ACV et SIG

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 (sous Brightway) 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.)

2 Cas d'étude n°2 : ACV des bâtiments à l'échelle urbaine → Couplage faible

L'objectif de ce cas d'étude est de montrer la faisabilité d'un couplage ACV-SIG pour l'évaluation de l'impact environnemental des bâtiments résidentiels à l'échelle d'une ville de grande taille et du potentiel de réduction d'impact en implémentant des mesures de rénovation des bâtiments.

2.1 Description du cas d'étude

Le parc de bâtiments résidentiels de la ville de Rotterdam (Pays Bas) a été pris comme cas d'étude. La ville compte une population d'environ 600 000 habitants et son parc de bâtiments résidentiels compte 290 000 logements.

Une large base de données SIG pour les bâtiments a été mise à disposition par la ville. Les données suivantes sont disponibles :

- Modèle Numérique d'Élévation obtenu à partir de données LiDAR, une technologie de télédétection utilisant des faisceaux laser pour l'acquisition et des levés topographiques. Cette couche raster contient des données d'élévation à une résolution de 50 cm x 50 cm (Fig. 5-a).
- Couche vectorielle des empreintes des bâtiments (polygones). La couche contient des attributs tels que l'année de construction et la fonction des bâtiments (Fig. 6-b).
- Couche vectorielle des adresses (points). La couche contient des attributs tels que la surface de plancher et le nombre d'habitants au niveau de logements (Fig. 6-b).
- Couche vectorielle des quartiers (polygones).

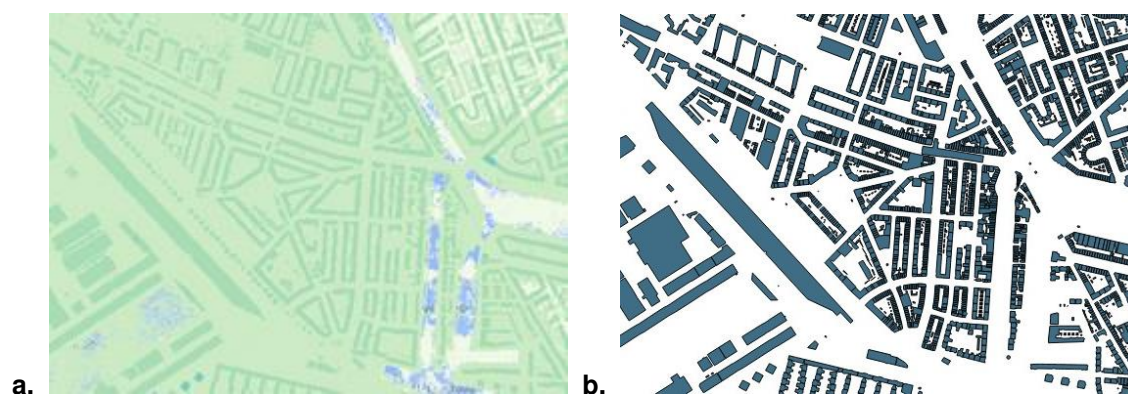


Figure 22: Données SIG fournies par la ville de Rotterdam : a. Modèle Numérique d'Élévation obtenu à partir de données LiDAR ; b. Couche vectorielle des empreintes des bâtiments.

Une étude précédente a été conduite pour caractériser le parc résidentiel de la ville et sa consommation d'énergie¹² et a servi comme base pour cette étude. Le parc résidentiel est caractérisé sur la base

¹² Mastrucci A., et al. (2014) Estimating energy savings for the residential building stock of an entire city: A GIS-based statistical downscaling approach applied to Rotterdam. *Energy and Buildings*, 75, pp. 358–367.

des typologies des logements (exemple : maisons individuelles, appartements, etc.) et des périodes de construction, ce qui permet de regrouper les bâtiments ayant des caractéristiques similaires et de les décrire convenablement.

2.2 Méthodologie

La méthodologie se compose des phases suivantes :

- Les données d'entrée spatialisées sont traitées par le SIG pour générer l'inventaire de premier plan du cycle de vie. Les caractéristiques géométriques et constructives des bâtiments ainsi que les profils de consommation d'énergie et d'eau sont extraits pour chaque bâtiment du cas d'étude.
- Analyse du cycle de vie : une série des éléments de référence des bâtiments sont identifiés et les impacts relatifs à leur rénovation et fin-de-vie sont calculés par unité dimensionnelle (p. ex. le mètre-carré pour la superficie de l'enveloppe). Pour la phase d'utilisation, les impacts liés à la fourniture d'énergie et d'eau sont calculés par unité d'énergie et volume d'eau respectivement.
- Un couplage ACV-SIG est nécessaire pour associer les impacts calculés aux bâtiments réels de la ville et agréger les résultats. Un connecteur est alors développé.

Les logiciels libres GRASS-GIS et QGIS ont été utilisés pour la partie SIG, le logiciel propriétaire SimaPro 7.3.3 pour la partie ACV et le logiciel libre R pour le développement du connecteur. Le logiciel R a été choisi pour la possibilité d'importer, traiter et exporter des données spatialisées.

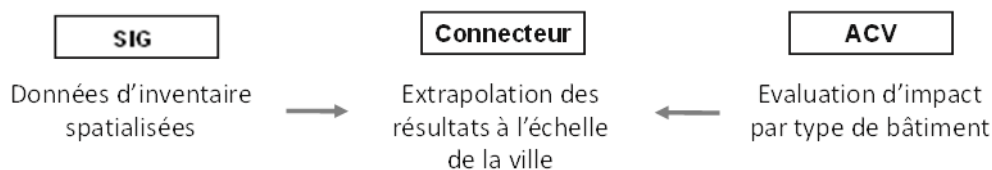


Figure 23: Couplage SIG-ACV réalisé pour le cas d'étude 2.

2.3 Utilisation du SIG pour générer l'inventaire du cycle de vie

Les données SIG disponibles ont été traitées pour générer des nouvelles données d'inventaire en utilisant les logiciels GRASS GIS et QGIS. Les données suivantes ont été générées:

- Hauteur moyenne des bâtiments

La hauteur moyenne des bâtiments est générée par l'intersection entre la couche raster d'élévation et la couche vectorielle des empreintes des bâtiments. Pour chaque bâtiment, la hauteur moyenne est calculée à partir de données d'élévation des pixels présents dans l'empreinte. Le résultat est obtenu avec la commande *r.statistics* dans GRASS GIS et le plugin *RasterStats* dans QGIS.

- Volume des bâtiments

Le volume des bâtiments est obtenu par le produit de la surface d'empreinte et la hauteur moyenne des bâtiments. Cette opération est facilement exécutable dans QGIS en utilisant la fonction « Field Calculator » dans le tableau des attributs relatif à la couche des empreintes des bâtiments. Le même type d'opération est exécutable dans GRASS GIS.

- Surface de plancher

Deux procédures alternatives ont été mises en œuvre pour obtenir la surface de plancher résidentielle des bâtiments (Fig. 7-a):

1. Utilisation des adresses de la base de données de la ville où les données de surface de plancher peuvent être agrégées à l'échelle de bâtiments (fonction « Join attributes by location » de QGIS).
2. Estimation à partir du volume des bâtiments en utilisant la formule suivante¹³:

$$Sp = 0,32 \cdot Vb$$

Avec Sp = surface de plancher ; Vb = volume brut du bâtiment.

L'efficacité des deux procédures a été testée en comparant les données obtenues indirectement par le SIG avec les données fournies par la ville.

- Surface de parois extérieures et typologie de bâtiment

Des algorithmes spécifiques ont été développés dans GRASS GIS en utilisant des commandes en langage SQL pour traiter les données des empreintes des bâtiments et distinguer la partie du périmètre vers l'extérieur de celle en commun entre deux bâtiments. La surface des parois extérieures est ensuite estimée en multipliant la longueur du périmètre externe par la hauteur moyenne.

Des algorithmes similaires ont permis d'évaluer la typologie de bâtiment (isolé, jumelé ou en bande) en calculant le nombre des bâtiments (voir polygones) adjacents à chaque bâtiment (Fig. 7-b).

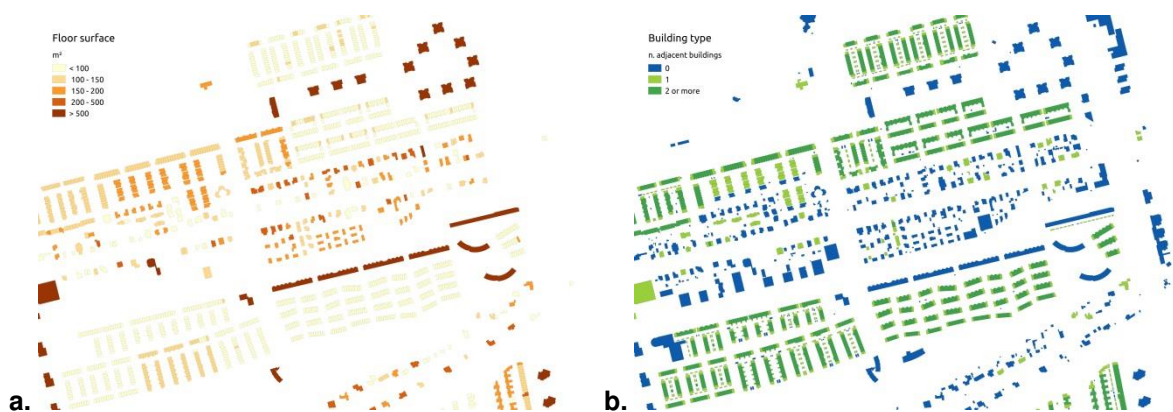


Figure 24: Données générées grâce au SIG : a. surface de plancher des bâtiments ; b. hauteur moyenne des bâtiments.

¹³ DIN, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, DIN 4108-2, 2011.

2.4 Inventaire du Cycle de Vie

Les phases du cycle de vie prises en compte sont les suivantes : utilisation, rénovation et fin de vie. Les paragraphes suivants décrivent l'inventaire de premier plan pour les différentes phases. La base de données ecoinvent 2.2 a été utilisée pour l'inventaire d'arrière-plan.

- Phase d'utilisation des bâtiments

La consommation d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire et la consommation d'électricité ont été attribuées sur la base des résultats d'un modèle statistique précédemment développé (Mastrucci et al., 2014). L'énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire est déterminée au niveau du bâtiment en fonction de la surface de plancher, du type de logement et de la période de construction ; l'électricité en fonction de la surface de plancher, du nombre d'occupants et du type de logement.

La consommation d'eau potable est estimée à partir de la base de données statistique nationale¹⁴. La consommation moyenne par personne relative à l'année 2010 (120,1 l / pers an) est multipliée par le nombre d'occupants des bâtiments, disponible au niveau des adresses pour la ville de Rotterdam, afin d'estimer la consommation totale.

- Phase de rénovation et fin-de-vie

Un set de composants et systèmes représentatifs des bâtiments pour chaque typologie et période de construction a été identifié pour ensuite évaluer les impacts liés à la phase de rénovation et fin-de-vie des bâtiments. Les composants et systèmes pris en compte sont les suivants :

- murs extérieurs et intérieurs,
- fenêtres et ouvertures,
- planchers et toitures,
- systèmes techniques pour chauffage et eau chaude sanitaire.

Les opérations prises en compte pour la rénovation des bâtiments sont les suivantes :

- isolation des parois extérieures, toiture et plancher du rez-de-chaussée ;
- remplacement des fenêtres ;
- remplacement du système de chauffage.

Les caractéristiques constructives des composants et des opérations de rénovations ont été obtenues à partir des normes et standards nationaux¹⁵. À titre d'exemple, les caractéristiques des composants opaques sont reportées dans le tableau 1. La production de matériaux et le transport ont été pris en compte pour l'analyse d'impact.

¹⁴ Centraal Bureau voor de Statistiek, CBS. <http://www.cbs.nl/>

¹⁵ Agentschap NL, Voorbeeldwoningen 2011 - Bestaande bouw, publicatie-nr.2KPWB1034 (2011).

Tableau 1: Composants de référence et transmittance thermique de bâtiments de différent type et période de construction.

Type de bâtiment	Période de construction	Murs extérieurs (U [kWh/m ² K])	Toiture (U [kWh/m ² K])	Planché rez.-de-ch. (U [kWh/m ² K])
Maisons Uni-familiales	< 1964	Brique (1.61)	Bois (1.54)	Brique (1.72)
	1965-1974	Brique - Béton (1.45)	Bois (0.89)	Béton (2.33)
	1975-1991	Brique - Béton (0.64)	Bois (0.64)	Béton (1.28)
	> 1991	Brique – Béton (0.36)	Bois (0.36)	Béton (0.36)
Maisons Multi-familiales	< 1964	Brique (1.61)	Béton (1.54)	Brique (1.72)
	1965-1974	Brique - Béton (1.45)	Béton (0.89)	Béton (2.33)
	1975-1991	Brique – Béton (0.64)	Béton (0.64)	Béton (1.28)
	> 1991	Brique – Béton (0.36)	Béton (0.36)	Béton (0.36)

2.5 Analyse d'impact

L'analyse d'impact a été effectuée selon la norme EN 15804 pour les catégories d'impact suivantes :

- réchauffement climatique ;
- épuisement de la couche d'ozone ;
- acidification ;
- eutrophisation ;
- création d'ozone photochimique ;
- épuisement des ressources abiotiques.

La méthode CML 2-baseline 2000 est utilisée. Pour la phase d'utilisation, les impacts ont été calculés par mètre-carré de surface de plancher. Pour la phase de rénovation et fin-de-vie, les impacts liés aux composants de référence de l'enveloppe des bâtiments sont calculés par unité dimensionnelle, c'est-à-dire par mètre-carré de superficie de composant.

2.6 Attribution des impacts aux bâtiments

L'attribution des impacts à chaque bâtiment réel est effectuée de manière automatique sur la base de la géométrie estimée par le SIG, de la typologie et de la période de construction en utilisant le connecteur R.

Les résultats d'analyse d'impact sont exportés de SimaPro sous forme de tableaux et importés dans R. La couche SIG relative aux bâtiments est aussi importée dans R après traitement par SIG. Une correspondance entre résultats d'analyse d'impact et bâtiments est établie sur la base de la typologie et période de construction des bâtiments. Les impacts totaux sont ensuite calculés pour chaque bâtiment en multipliant l'impact unitaire pour la dimensionne relative. Par exemple, l'impact relatif à la rénovation des murs extérieurs est calculé en multipliant l'impact par unité de surface par la surface

totale de murs extérieurs des bâtiments. Pour calculer les impacts liés à la phase d'utilisation des bâtiments, une durée de vie résiduelle dépendante du type de bâtiment et de la période de construction est prise en compte. Les résultats totaux sont enfin normalisés par année.

Les résultats sont générés comme attributs dans la couche des bâtiments et sont exportables directement en fichiers SIG (p.ex. shapefile).

2.7 Résultats

Les résultats sont montrés à titre d'illustration pour le potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP). La fig. 8 montre l'impact annuel des bâtiments dû à la fourniture d'électricité et d'eau potable.

La fig. 9 montre l'impact des bâtiments pour deux différents scénarios testés : sans ou avec rénovation des bâtiments. L'utilisation de gaz pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire ainsi que la phase de rénovation (seulement pour le deuxième scénario) et la fin de vie ont été pris en compte pour générer les résultats. Il est possible de noter que le GWP des bâtiments dans le deuxième cas avec rénovation est sensiblement plus bas que dans le premier cas sans rénovation.

On peut enfin utiliser le SIG pour agréger les résultats, p.ex. au niveau de quartiers, et montrer les résultats à l'échelle de la ville entière (Fig. 10). Ce type de représentation peut être utile pour communiquer les résultats et supporter les décisions pour la planification durable de la ville.

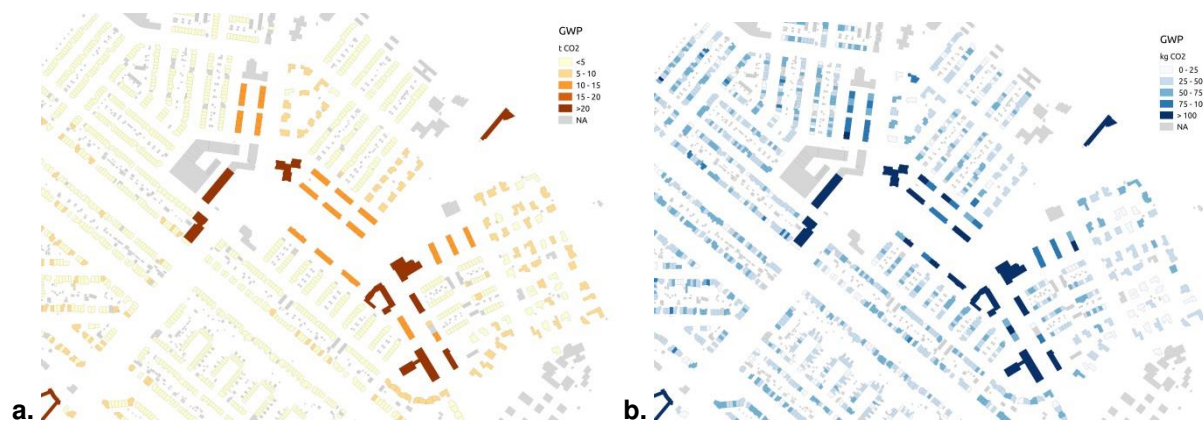


Figure 25: Carte du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) annuel lié à la fourniture d'électricité (a.) et d'eau potable (b.) pour la ville de Rotterdam – Pays Bas.

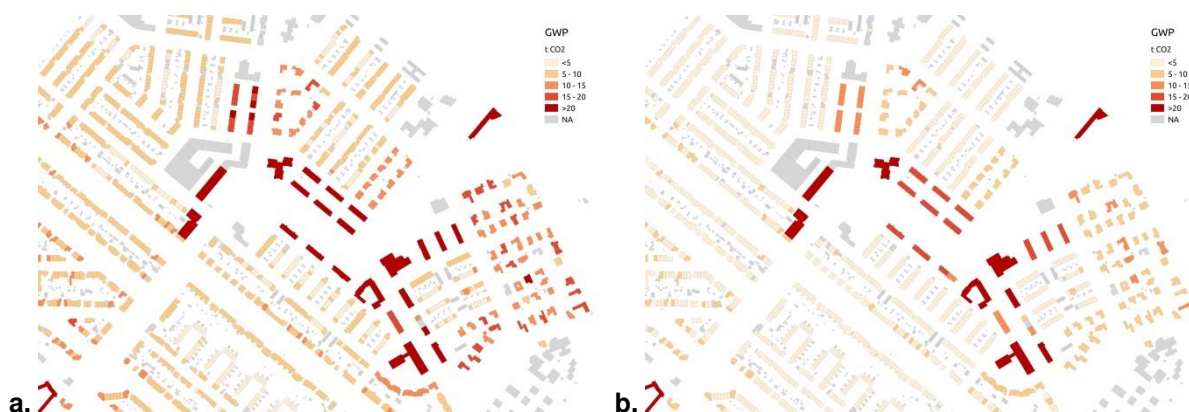


Figure 26: Carte du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) annuel sans ou avec la rénovation des bâtiments résidentiels de la ville de Rotterdam (a. et b. respectivement).

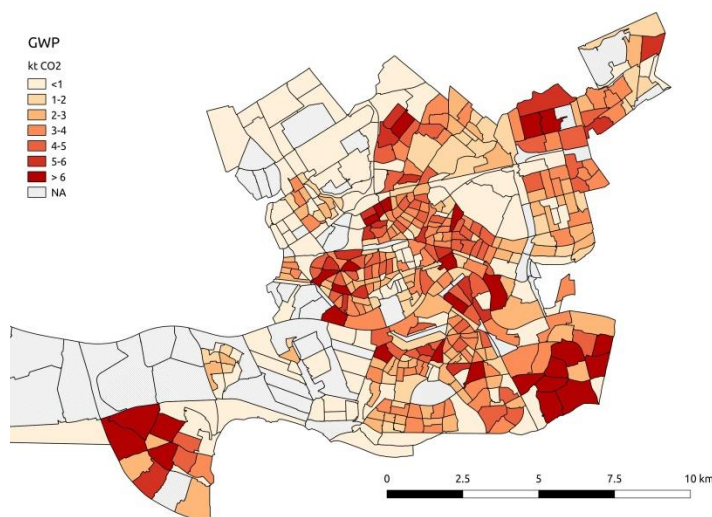


Figure 27: Carte du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) annuel sans rénover les bâtiments résidentiels de la ville de Rotterdam. Résultats agrégés à l'échelle de quartier.

2.8 Écarts en termes de charge de travaux

L'utilisation du SIG et l'automatisation de calculs permettent de traiter une grande quantité de données en temps réduits et de réduire significativement la charge de travail pour la mise en œuvre des ACV à l'échelle des villes ou territoriale. Néanmoins, un effort additionnel est demandé pour mettre en œuvre le traitement des données SIG et du connecteur ACV-SIG. L'implémentation de certaines opérations SIG dans les logiciels ACV pourra contribuer à réduire la charge de travail. Les opérations pourraient être réalisées en utilisant Excel comme connecteur sans changer significativement la charge de travail.

Pour le cas d'étude présent, le temps de travail pour le traitement de données SIG, l'analyse ACV et la mise en place du couplage est estimé en 2 semaines. Le temps estimé n'inclut pas la phase de caractérisation du parc immobilier et sa consommation d'énergie, objet d'une étude précédente (v. section 2.1).

2.9 Conclusions

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 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.

III. Recommandations

1 Introduction

Ce guide pratique permet aux praticiens industriels et institutionnels de mieux comprendre la pertinence et le degré d'un couplage ACV et SIG selon le contexte et les objectifs de l'étude. Les recommandations se basent sur la revue de littérature (partie I), les cas d'études du projet (partie II), les discussions avec les membres SCORE LCA et les points de vue personnels des auteurs du Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST).

Le rapport présente d'abord le niveau de pertinence du couplage selon les critères de définition des objectifs et champ de l'étude, ainsi que les prérequis pour la mise en place des différents types de couplage. Les conclusions de ces deux premières parties permettent de dresser des recommandations pratiques sur le choix et la mise en œuvre du couplage ACV-SIG. Enfin, les potentielles barrières et précautions d'utilisation sont abordées pour mettre en avant les développements à effectuer dans le domaine de l'ACV pour faciliter l'utilisation du SIG.

2 Pertinence du couplage selon les objectifs et champ de l'étude

Le SIG permet d'augmenter la précision et la représentation géographiques des résultats ACV, que ce soit pour l'inventaire ou pour l'évaluation des impacts. Son utilisation, qui demande un effort additionnel, dépend donc des objectifs et du champ de l'étude ACV (Le Feon & Aissani, 2015). En particulier, nous détaillons ici le degré de pertinence d'un couplage ACV-SIG en fonction du type d'application visé, du contexte de décision, de l'audience visée, du secteur du système étudié, de l'unité fonctionnelle, des critères de qualité des données et des impacts environnementaux considérés.

2.1 Type d'application

L'utilisation la plus pertinente est pour un support de développement stratégique de politique (comme dans Ooba et al, 2015 et Geyer et al, 2013 pour le développement de la production d'énergie renouvelable à l'échelle nationale ou dans Sohnen et al, 2015 pour l'introduction de véhicules électriques en Californie) qui inclut également les problèmes d'optimisation (p.ex. Delivand et al, 2015). En effet, la grande portée des résultats nécessite une représentativité de qualité élevée. De plus, les conséquences environnementales se situent normalement à grande échelle, ce qui peut entraîner une variabilité géographique des résultats au sein même des frontières du système. Dans le cas d'une optimisation des impacts environnementaux, le couplage ACV-SIG est essentiel pour faire interagir les deux outils (le SIG simule des nouvelles données d'inventaire en fonction des résultats d'ACV tandis que l'outil ACV recalcule les résultats à partir des nouvelles données du SIG).

Le couplage SIG et ACV peut également être pertinent pour une aide à la décision, même à plus petit échelle, c.à.d. pour l'écoconception, la comparaison de produits ou l'amélioration environnementale de la chaîne de fournisseurs. Dans ce cas, selon le système étudié, 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 d'ACV simplifiée d'un point de vue méthodologique, comme pour rapporter des performances environnementales, une déclaration environnementale ou pour développer un critère d'écolabel.

2.2 Contexte de décision

Comme expliqué dans le paragraphe 1.1, l'intérêt du SIG se révèle d'autant plus important pour une étude ACV lorsque celle-ci a pour objectif de supporter une décision (situations A et B décrites dans le guide ILCD (EC, 2010) et d'autant plus lorsque l'échelle des effets est grande (contexte de décision de type B « Meso/macro-level decision support »).

2.3 Audience

Il n'y a pas un lien direct en l'utilisation du SIG et l'audience. Cependant, la visualisation des résultats par carte, via un couplage, peut avoir une plus grande utilité lorsque l'audience visée concerne un public large, non spécialisé en ACV. Ce type de communication peut en effet être plus facilement compréhensible et avoir un plus grand impact sur l'audience.

2.4 Secteur

Comme observé dans l'état de l'art (livrable D1.2), l'utilisation du SIG pour les données d'inventaire a notamment été effectuée 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, de nombreuses données SIG peuvent faciliter la collecte (p.ex. carte des bâtiments d'une ville, localisation des sites de production, types de sols, etc.) et permettre de calculer des données d'inventaire (p.ex. distance entre deux points, surface de plancher, infiltration des polluants, etc.).

2.5 Unité fonctionnelle

La définition de l'unité fonctionnelle (UF) peut comprendre des spécificités géographiques, p.ex. la fourniture de chauffage, d'eau chaude et d'électricité pour chaque bâtiment d'une municipalité (Saner et al., 2014), la livraison d'une tonne de papier à Los Angeles en 2007 (Newell and Vos, 2011) ou l'opération des principales activités polluantes de Sheffield sur un an (Azapagic et al., 2013). Dans ce cas, l'utilisation du SIG peut apporter des données spécifiques à l'UF et visualiser les résultats pour le contexte géographique de l'UF.

2.6 Critères de qualité de données

Après avoir identifié les frontières du système et donc les différents flux, l'ACViste doit spécifier les critères de qualité de données. Certaines études ACV peuvent nécessiter une certaine résolution géographique des résultats (p.ex. par bâtiment dans Reyna & Chester, 2013 ; par champ de culture dans Gasol et al, 2011 ; par sites de production dans Dresen and Jandewerth, 2012). Dans ce cas, un couplage ACV-SIG est nécessaire. La pertinence du couplage est aussi élevée pour des données spécifiques (normalement pour les procédés de premier plan, avec une contribution significative sur les résultats), sensibles à la variabilité géographique (p.ex. densité de population, température, distance de transports).

2.7 Impacts environnementaux

A partir de l'état de l'art, la toxicité (humaine et écotoxicité) et l'impact du bruit sont très sensibles à la variabilité géographique (Kounina et al, 2014 ; Cucurachi & Heijungs, 2014). 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). Ceux-ci peuvent être exprimés par bassin versant (Pfister et al, 2009 ; Azevedo et al, 2013), par région (de Baan et al, 2013a ; Finnveden & Nilsson, 2005) ou par archétype (Humbert et al, 2011 ; Helmes et al, 2011). 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 (McKone et al, 2011 ; de Baan et al, 2013b). Le niveau de résolution des facteurs de caractérisation est encore un sujet de débat dans la communauté ACV, qui demande des analyses supplémentaires (voir paragraphe 3.2). Pour l'instant, nous recommandons l'utilisation du SIG seulement à partir du caractère régional de la catégorie considérée.

2.8 Récapitulatif

Le Tableau 3 récapitule les conclusions des paragraphes précédents à partir d'une échelle de l'intérêt du couplage ACV-SIG pour chacun des critères de la définition des objectifs et champ de l'étude.

Tableau 3 : 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

3 Mise en œuvre du couplage

3.1 Niveaux de couplage

Cette section vise à décrire les différents niveaux de couplage possibles entre ACV et SIG en détaillant les techniques ainsi que les compétences, le temps et la charge de travail requis pour leur mise en œuvre. Nous rappelons ici que le niveau de couplage entre deux composants de logiciels indique la mesure dans laquelle les deux composants interagissent en termes d'échange d'informations. Les sept niveaux de couplage existants (Pressman, 1992) ont été regroupés en deux groupes pour démontrer plus efficacement leur potentiel usage: couplage faible et couplage fort. De plus, nous avons également inclus l'utilisation du SIG sans interaction automatisée avec l'ACV, appelé ci-dessous « absence de couplage ».

3.1.1 Absence de couplage

L'absence de couplage représente le niveau d'interaction le plus bas, où les différents outils n'échangent pas d'information. Dans ce cas, des données SIG sont introduites dans l'analyse ACV de façon manuelle et non structurée. Cela peut permettre de régionaliser l'inventaire ou l'évaluation des impacts de façon simplifiée. Cependant, cette méthode manque de répliquabilité (pas d'automatisation et de traçabilité de l'échange de données entre outils SIG et ACV) et n'est faisable que si le nombre de données SIG est limité. Par exemple, la distance de transport avec un fournisseur ou la surface d'une culture peut être obtenue grâce à un logiciel SIG et recopiée dans un logiciel ACV. Des scénarios pour différentes zones géographiques peuvent également être créés dans un logiciel ACV. Pour la caractérisation des impacts, il est possible d'adapter une méthode existante en ajoutant des nouveaux flux pour la(es) zone(s) géographique(s) considérées. Par exemple, un flux « Phosphate, in water, France » peut être associé à la valeur du tableau des facteurs d'eutrophisation par pays d'EDIP 2003 (Potting & Hauschild, 2005). Ce flux devra alors être aussi utilisé lors de la construction de l'inventaire.

3.1.2 Couplage faible

Le couplage faible dénote un niveau d'interaction limité entre les logiciels, qui échangent une quantité réduite d'information (p.ex. nombres ou tableaux). Souvent, le couplage est mis en œuvre grâce à un connecteur externe qui fait le lien entre logiciels ACV et SIG.

Dans le cas de la spatialisation de l'inventaire du cycle de vie, on peut pré-calculer les impacts par unité spatiale de référence en utilisant un logiciel ACV et procéder ensuite à leur association avec les valeurs spatiales calculées grâce au SIG. Par exemple, dans le cas d'une ACV dans le secteur de l'agriculture, l'impact lié à un certain type de culture pourrait être calculé par mètre-carré de surface cultivé et ensuite extrapolé à l'échelle du territoire étudié en associant l'impact unitaire aux différentes surfaces cultivées géo-localisées.

Une telle association pourrait être accomplie directement dans l'outil SIG en utilisant les fonctions de traitement des attributs d'une couche vectorielle, par exemple avec une requête SQL. Un connecteur, p.ex. tableur Excel, code en R ou autre, peut aussi faire le lien entre les résultats d'impact et les données SIG, fournies dans ce cas sous forme de tableaux. Pour cela, il faudra garantir la compatibilité des formats de fichiers échangés entre les différents logiciels (p.ex. format CSV). Les résultats d'impact peuvent être finalement importés dans le SIG, reliés à la couche vectorielle d'origine grâce à un identifiant et visualisés sous forme de cartes.

Dans le cas d'une évaluation d'impact différenciée dans l'espace, un traitement de la couche SIG des facteurs de caractérisation devra être effectué dans le connecteur pour faire correspondre les identifiants avec la localisation géographique des procédés d'inventaire.

Le temps et la charge de travail pour la mise en œuvre de ce type de couplage sont de faibles à moyens (de une à quatre semaines selon le nombre de données SIG et la complexité de traitement). Un minimum de compétences SIG est requis.

3.1.3 Couplage fort

Le couplage fort constitue le niveau le plus poussé où les logiciels interagissent en échangeant une grande quantité d'informations. L'échange des informations peut se produire dans les deux directions. Le couplage peut être effectué dans le logiciel ACV ou grâce à un connecteur externe.

Couplage dans le logiciel ACV

Dans ce cas, le logiciel ACV possède des fonctions de lecture et de traitement de données SIG. Aujourd'hui, seuls OpenLCA et Brightway2 autorisent cette interaction. De plus, ils sont « open-source » et permettent donc d'ajouter des fonctionnalités, moyennant un effort de programmation additionnel.

Le logiciel OpenLCA permet d'associer un procédé d'inventaire à une localisation géographique, via un fichier KML représentant un point, une ligne ou un polygone (Rodríguez et al, 2014). Grâce au format Ecospold 2 de la base de données ecoinvent v3, les données d'arrière-plan peuvent elles aussi être spatialisées. Cependant, il n'est pas encore possible d'associer une distribution géographique à un procédé ou des paramètres d'inventaire (p.ex. distribution des types de culture d'un pays, distribution des températures). Les développeurs ont également démontré la possibilité d'intégrer des facteurs de caractérisation régionalisés, en les calculant à partir de données géographiques importées dans le logiciel. Même si les résultats ont été publiés pour un cas d'étude évaluant les impacts d'utilisation des terres et de consommation d'eau (Rodríguez et al, 2014), cette fonction additionnelle n'est pas encore disponible pour les utilisateurs. Enfin, OpenLCA permet de visualiser les résultats sur une carte.

Brightway2 permet grâce à son plug-in *bw2-regional*¹⁶ de gérer la spatialisation de l'inventaire et des méthodes de caractérisation des impacts ainsi que d'exporter des cartes localisant les régions contribuant à l'impact du procédé étudié. Le plug-in utilise des « conteneurs » appelés *geocollections* pour organiser et décrire les identifiants de données spatialisées à utiliser pour l'inventaire et les méthodes d'évaluation d'impact. Les *geocollections* ne sont pas des jeux de données spatialisées en soi mais peuvent être associés à des couches vectorielles ou raster. Une série de *geocollections* standard est déjà installée automatiquement, incluant : la localisation générique globale, tous les pays du monde, les régions définies par l'ONU et les régions spatiales définies dans *ecoinvent 2* et *ecoinvent 3*. *bw2-regional* permet de stocker des facteurs de caractérisation d'impact spatialisés en spécifiant l'objet spatial relatif grâce aux *geocollections* ou au code ISO spécifique d'un pays. Les échelles des jeux de données d'inventaire et de caractérisation d'impact peuvent être différentes, par exemple régions pour les données d'inventaire et bassins versants pour la caractérisation d'impact. Une intersection entre les différentes couches est alors nécessaire. Cette opération peut être exécutée en utilisant soit le SIG, soit la fonction *pandarus* disponible pour *bw2-regional*. La distribution spatiale des émissions d'arrière-plan est prise en compte pour répartir les données d'inventaire à l'échelle de la méthode d'évaluation des impacts.

¹⁶ <https://brightway2-regional.readthedocs.org/>

Les compétences en SIG requises pour le couplage dans le logiciel ACV sont plutôt basiques car le logiciel contient déjà les fonctions de traitement. Le temps et la charge de travail sont de faibles à moyens (de une à quatre semaines selon la quantité de données régionalisées et la complexité de traitement). Des compétences de programmation, temps et charge de travail additionnels sont à prévoir pour développer des fonctions de spatialisation (nécessaire pour l'état actuel d'OpenLCA) ou pour utiliser Brightway2 (langage de programmation: *python*).

Couplage avec connecteur externe

Le couplage se produit grâce à un connecteur externe qui peut faire appel aux fonctions du logiciel ACV et du logiciel SIG pour obtenir les données requises et lancer le calcul ACV. Par rapport au couplage faible, tout peut être contrôlé à partir du connecteur. Les données échangées doivent être compatibles avec les logiciels utilisées. Ce type de couplage donne plus de liberté pour l'usage et le traitement des données ACV et SIG. Un couplage de type fort est approprié pour l'automatisation de calculs, par exemple face à une grande quantité des données à traiter, à une résolution spatiale fine ou à une étude à grande échelle (p.ex. ACV territoriale). Enfin, un couplage fort est nécessaire pour le traitement des problèmes d'optimisation spatiale en ACV, qui demandent un échange d'information bidirectionnel entre outils ACV et SIG avec feedback.

Le temps et la charge de travail pour mettre en œuvre ce type de couplage sont moyens (de trois à quatre semaines). Au-delà des compétences requises en ACV et SIG, des compétences en programmation sont nécessaires pour effectuer ce type de couplage (p.ex. utilisation du langage Python pour l'interaction entre logiciels SIG et Brightway2).

3.2 Récapitulatif

Le Tableau 4 synthétise les possibilités d'application des différents types de couplage selon les compétences, la charge de travail et la quantité de données SIG incluses dans l'ACV.

Tableau 4 : 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 (+/++)

4 Recommandations

4.1 Type de couplage

Afin de fournir des recommandations pratiques, un arbre de décision a été élaboré (Figure 28). 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. Nous détaillons ci-dessous les étapes de l'arbre, en partant des conditions les plus favorables à un couplage (partie gauche) à celles les moins favorables (partie droite).

Tout d'abord, on teste si l'ACV est utilisée comme support à la décision. Dans ce cas, un couplage devient pertinent si l'objectif est de supporter une stratégie territoriale ou industrielle avec une résolution géographique des résultats (visualisation par carte requise). Un couplage fort est nécessaire dans le cadre d'une optimisation spatiale (communication automatique entre les deux outils). Pour ces types d'étude, il est obligatoire d'avoir un minimum de compétences SIG, étant donné que l'objectif est de présenter des résultats d'ACV distribués dans l'espace. Le choix du couplage faible ou fort sera donc guidé par les compétences informatiques de l'équipe de travail.

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 (p.ex. température moyenne d'une région, calcul de distances, aire des bâtiments d'une ville). Le couplage peut être utile pour intégrer ces informations automatiquement, sachant que son intérêt augmentera si des impacts régionaux sont considérés (superposition des couches d'inventaire et d'évaluation des impacts nécessaire). Le couplage recommandé dépend alors du nombre de données à traiter, du temps disponible et des compétences de l'équipe ACV. Pour la quantité de données, nous avons estimé qu'au-dessus de 20 paramètres spatialisés (inventaire et impact), un minimum d'automatisation est nécessaire pour assurer la fiabilité et la répliquabilité des résultats. Le critère de 20 reste cependant subjectif et peut être modifié selon le jugement de l'expert ACV. Un couplage faible ou fort avec une quantité conséquente de données SIG à traiter demande un certain temps (ici estimé à 2 semaines). Comme précédemment, le choix entre couple faible ou fort dépendra des compétences de l'équipe ACV. Si peu de temps est disponible, il est possible de prioriser les données selon leur contribution aux résultats ACV et leur variabilité géographique. Avec un nombre restreint de données, le praticien peut assez facilement mettre en place un couplage faible pour assurer la correspondance entre données SIG et ACV. Si les compétences SIG et informatiques sont restreintes, il peut alors identifier les données spatiales dans le logiciel SIG et les recopier manuellement dans le logiciel ACV, sachant que les résultats seront difficilement réutilisables dans le futur (manque de traçabilité des données échangées).

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).

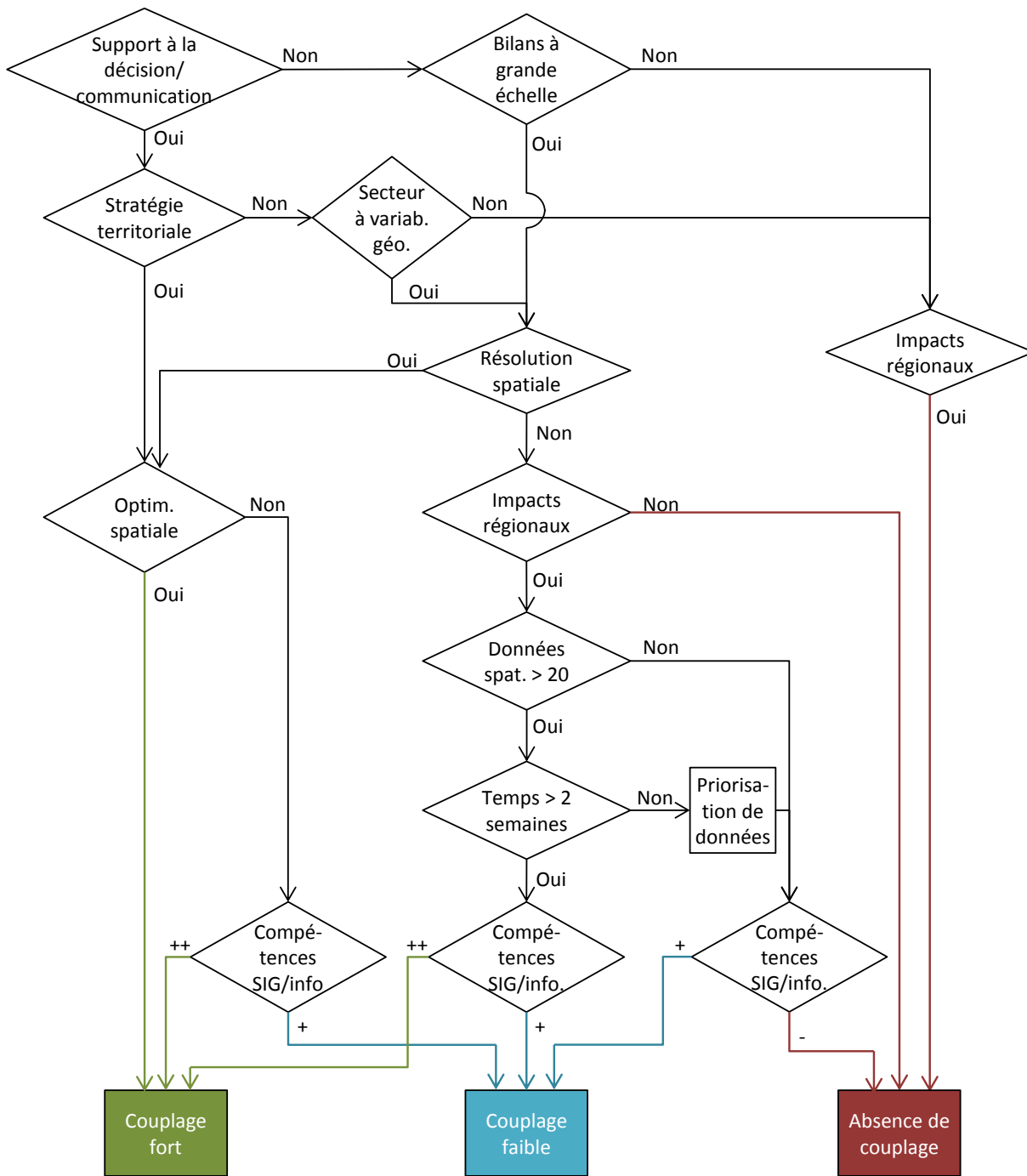


Figure 28 : Arbre de décision pour le choix type de couplage ACV-SIG recommandé

4.2 Recommandations pratiques

Cette section vise à donner des recommandations pratiques pour la mise en œuvre du couplage ACV-SIG en prenant en compte différentes facettes telles que la disponibilité de bases de données spatialisées, la résolution spatiale de l’analyse et les critères pour la visualisation de résultats.

4.2.1 Bases de données

Plusieurs bases de données, disponibles dans le domaine public, ont été passées en revue dans l'état de l'art (livrable D1.2). Le Tableau 5 présente l'intérêt des bases de données suivantes selon le secteur de l'analyse ACV :

- Natural Earth
- *Global Rural-Urban Mapping Project* (GRUMP)
- *Socioeconomic Data and Application Center* (SEDAC)
- *Harmonised World Soil Database* (HWSD)
- *European Pollutant Release and Transfer Register* (E-PRTR)
- *OpenStreetMap* (OSM)
- *Marine Safety Information* (MSI)
- HydroSHEDS

Les bases de données Natural Earth, GRUMP et SEDAC contiennent des données d'intérêt général, telles que les frontières de pays et de villes, les zones urbaines et rurales, données de type socio-économique utilisables dans plusieurs secteurs. Les données de types de sols de la base HWSD peuvent être utilisées pour le secteur agricole, industriel et des infrastructures. La base de données E-PRTR contenant des informations sur les industries et leur pollution peut s'avérer pertinente pour le secteur de l'industrie et de l'énergie. OpenStreetMap représente une importante base de données (ouverte à toute contribution) présentant des informations de différente nature exploitables dans plusieurs secteurs. La base de données MSI focalisée sur les routes maritimes est pertinente pour le secteur des transports et infrastructures, mais également pour tout secteur incluant des transports sur mer. Enfin, les données des bassins versants de HydroSHEDS peuvent être utilisées pour le secteur de l'agriculture et des infrastructures.

Tableau 5 : Bases de données disponibles publiquement et pertinence avec différents secteurs.

Secteur	Bases de données							
	Natural Earth	GRUMP	SEDAC	HWSD	E-PRTR	OSM	MSI	Hydro SHEDS
Agriculture	X	X	X	X				X
Industrie	X	X	X	X	X	X	X	
Énergie	X	X	X		X	X		
Infrastructures	X	X	X	X		X	X	X
Transports	X	X	X			X	X	

Au-delà des bases de données du domaine public, les informations spatiales des autorités publiques (positionnement des bâtiments, des infrastructures, des réseaux de transport, usage des sols, etc.) peuvent être rendues disponibles. De plus en plus, les autorités montrent un intérêt à parta-

ger leurs données spatialisées (p.ex. en les mettant en ligne gratuitement comme la ville de Rotterdam¹⁷, Genève¹⁸ ou Lyon¹⁹). En ce qui concerne l'évaluation des impacts, les fichiers SIG peuvent être fournis par les développeurs de méthodes. Pour l'instant, la méthode IMPACT World+TM n'est pas disponible pour les différentes résolutions spatiales envisagées (globale, pays, maille). Seule la catégorie d'utilisation de l'eau est disponible sous format SIG sur le site web du CIRAIG²⁰.

4.2.2 Visualisation des résultats

Dans le cas d'une étude ACV spatialisée, le SIG constitue un outil efficace pour la représentation des résultats. Les impacts environnementaux peuvent être visualisés dans l'espace comme cartes.

La visualisation peut être représentée sous forme de raster ou de vecteur. Dans le cas de vecteurs, les résultats pourraient être représentés comme points, lignes ou polygones. Par exemple, l'impact des opérations de raffinage de pétrole peut être représenté par des points alors que l'impact des bâtiments à l'échelle urbaine comme polygones (Figure 2). Le choix de l'échelle de couleur et autres critères de format conditionne également la bonne communication des résultats. Par exemple, pour une carte montrant des résultats quantitatifs continus (Figure 2 b.), l'échelle de couleurs devrait être, elle aussi, continue (p.ex. différents tons dans la même tonalité) et non de type *random*. En outre, la carte devrait transmettre le résultat souhaité sans être surchargée de texte ou autres symboles.

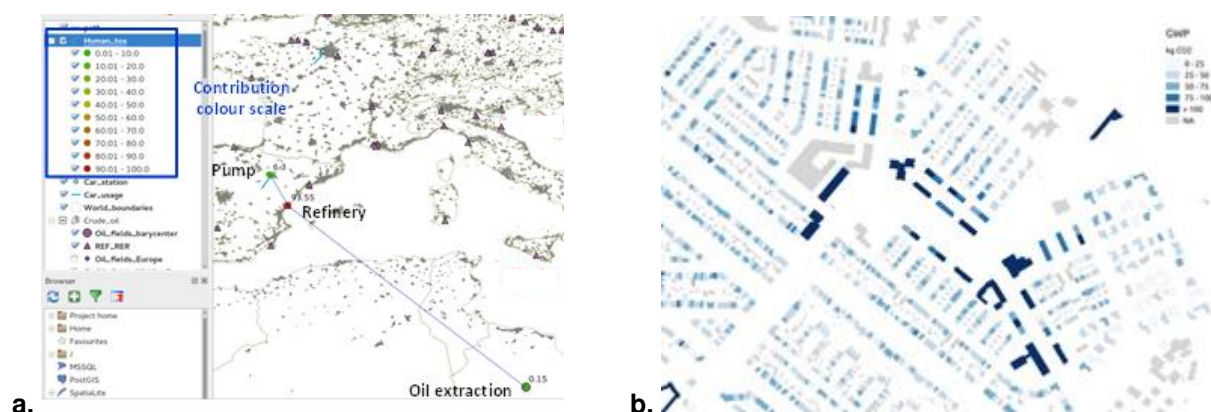


Figure 29 : Résultats d'analyse d'impact montrés en SIG comme points (a.) et polygones (b.).

Choisir la résolution optimale pour restituer graphiquement les résultats représente un facteur essentiel pour une communication efficace. Selon l'échelle et l'objectif de l'étude, les résultats peuvent être agrégés à une échelle différente de celle pour laquelle les résultats ont été générés. Par exemple, pour une étude d'impact des activités industrielles dans une région, les résultats pourraient être représentés sur une maille régulière ou agrégés par commune selon le but de l'étude. La Figure 3 montre les résultats d'une ACV des bâtiments à l'échelle d'une ville au niveau de bâtiment pour un quartier et

¹⁷ <http://rotterdamopendata.nl/dataset/gebiedsgrens-rotterdam-3d-open/resource/1a591708-5f4a-430c-ad90-61b70774012b>

¹⁸ <http://ge.ch/sitg/cartes>

¹⁹ <http://data.grandlyon.com/acceder-aux-donnees/>

²⁰ <http://www.ciraig.org/fr/wateruseimpacts.php>

au niveau de quartier pour la ville entière. Le choix des paramètres à représenter est aussi à prendre en compte. La représentation des résultats d'impact totaux ou normalisés, par exemple par nombre d'habitant ou par unité de surface, peut générer des cartes très différentes.

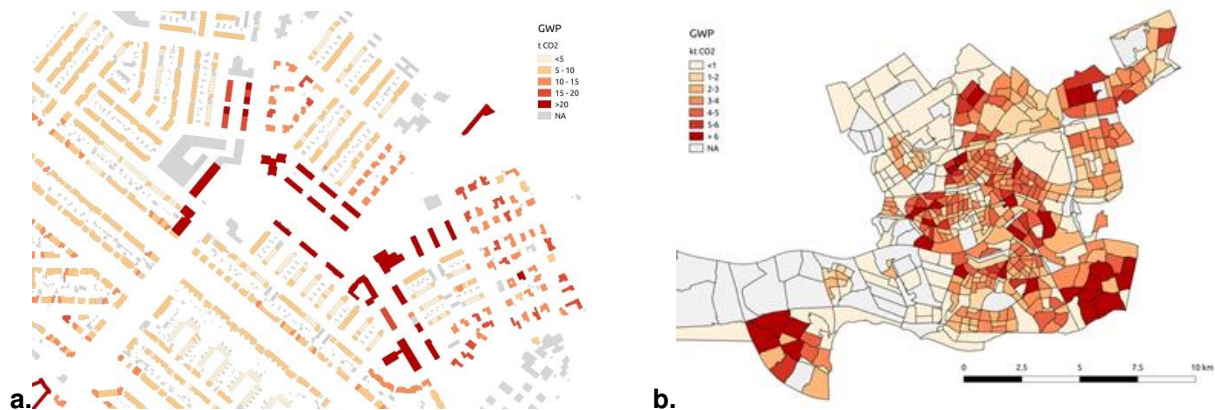


Figure 30 : Carte du potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential GWP) des bâtiments résidentiels de la ville de Rotterdam : a. à l'échelle de quartier ; b. à l'échelle de la ville.

5 Limitations et discussion

5.1 Barrières d'implémentation

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. Il faut avoir certaines connaissances SIG pour trouver les informations utiles dans les bases de données. Ce manque de données est aussi visible pour les procédés d'arrière-plan. Même siecoinvent 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. Il restera toujours difficile d'avoir une résolution spatiale pour les procédés d'arrière-plan aussi fine que pour ceux de premier plan. Cependant, cette différence de précision n'est pas forcément gênante car elle est également présente pour d'autres critères de qualité, et le décideur a normalement une influence limitée aux procédés de premier plan (p.ex. choix du fournisseur, mode opératoire du procédé, politique de mobilité du territoire étudié).

Pour compenser un manque de données, il est possible de générer des nouvelles données spatialisées à partir de données existantes. Par exemple, la hauteur et le volume des bâtiments d'une ville peuvent être calculés à partir de l'empreinte des bâtiments 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 faible ou fort demande des compétences 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. Par exemple, le praticien peut exporter les attributs d'une couche SIG sous forme de tableau (p.ex. le type de cultures d'un territoire avec les surfaces associées), exporter les résultats ACV sous forme de tableau (p.ex. résultats d'impact pour 1 m² de chaque culture) et copier ces deux fichiers dans un tableur Excel pour procéder à la multiplication des impacts par les surfaces et ajouter les résultats comme attributs de la

couche SIG. Même si ce type de couplage ne requiert pas de compétences informatiques avancées, 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. Effectivement, le temps disponible est généralement plus limité. Si les compétences requises ne sont pas présentes dans l'équipe, il faut alors faire appel à un groupe extérieur et donc engager un budget supplémentaire, ce qui n'est pas toujours possible.

5.2 Précautions d'utilisation

Le couplage ACV-SIG permet une meilleure représentativité géographique des résultats. Or, 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 adéquation des résolutions entre inventaire et méthodes d'impact induites par le manque de précision des bases de données ACV (zones « Rest of the World » différentes, chevauchement géographique possible entraînant un double comptage).

Comme souligné dans le paragraphe 4.1, le praticien doit donc avoir 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.

5.3 Développements futurs

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. Par exemple, Mutel et al (2012) propose une méthode basée sur l'autocorrélation spatiale des facteurs. Ce développement est essentiel pour assurer l'utilisation des facteurs, développés par les instituts de recherche, par d'autres utilisateurs.

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. Par exemple, beaucoup d'activités sont référencées pour un pays alors que certaines méthodes d'impacts ont une résolution plus petite, allant jusqu'à la maille. Or, les émissions de ces activités ne sont pas uniformément réparties sur tout le territoire. C'est pourquoi Brighway2 a développé la fonction *pandarus* (voir paragraphe 2.1.3). Ce problème est encore peu souligné dans les études ACV incluant des données SIG. En fait, comme observé dans le livrable D1.2, les études spatialisant à la fois l'inventaire et l'évaluation des impacts restent rares.

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.

Il est aussi intéressant de noter que les développeurs d'outils ou données SIG pourraient bénéficier de l'ACV. Des bases de données intègrent déjà des données de type ACV, mais celles-ci se limitent à l'inventaire d'émissions ou de ressources, ou à la caractérisation des gaz à effet de serre (en terme d'équivalent CO₂)²¹²². Nous pourrions imaginer dans le futur une plus grande sensibilisation du public aux indicateurs environnementaux et donc une intégration de couches « ACV » dans les bases de données SIG comme support à la planification de politique, notamment pour l'aménagement du territoire.

6 Conclusion

Cette dernière partie permet de comprendre l'intérêt et la mise en œuvre d'un couplage selon le contexte de l'étude et les compétences de l'équipe ACV.

Tout d'abord, nous avons établi une échelle de pertinence selon les critères de définition d'objectif et champ de l'étude. Le plus grand intérêt concerne une application comme support à la décision, notamment pour une stratégie territoriale ou une optimisation des impacts environnementaux. La spécification géographique de l'unité fonctionnelle, ainsi qu'une résolution spatiale requise pour les données élève le niveau d'importance de l'utilisation du SIG. Enfin, le caractère régional des catégories d'impact (p.ex. toxicité, eutrophisation, acidification, utilisation de l'eau, utilisation des terres) peut pousser le praticien à mettre en place un couplage SIG-ACV.

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).

L'arbre de décision développé dans ce rapport permet de guider le praticien ACV dans son choix de couplage selon les critères des objectifs et champ de l'étude, de la quantité de données, du temps et des compétences disponibles. La classification des bases de données selon le secteur d'application et les conseils de visualisation des résultats servent de support pour les aspects pratiques de l'utilisation du SIG.

Enfin, la dernière partie de discussion permet de souligner les barrières d'implémentation d'un couplage, liées à la disponibilité des données (de premier plan et d'arrière-plan), aux compétences SIG requises (p.ex. pour générer de nouvelles couches ou harmoniser les différentes échelles), aux compétences informatiques requises (notamment pour un couplage fort) et à la charge de travail supplémentaire. Des précautions d'utilisation ont également été soulevées par certains auteurs, par rapport au choix de l'échelle et à l'interprétation des résultats, qui démontrent la nécessité d'un niveau minimum en SIG pour la mise en place d'un couplage. Pour finir, les avancements en ACV vis-à-vis du

²¹ <https://catalog.data.gov/dataset?tags=co2>

²² <http://www.mapsearch.com/products/co2-processing-plant-maps-and-gis-data.html>

développement et de l'utilisation de base de données et de méthodes spatialisées vont faciliter leur application et intégration dans les logiciels ACV.

Bibliographie

- Arodudu, O., Ibrahim, E., Voinov, A., & van Duren, I. (2014). Exploring bioenergy potentials of built-up areas based on NEG-EROEI indicators. *Ecological Indicators*, 47, 67–79. doi:10.1016/j.ecolind.2014.04.042
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., & Scrucca, F. (2015). Comparative life cycle assessment of an innovative CSP air-cooled system and conventional condensers. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(8), 1076–1088. doi:10.1007/s11367-015-0901-z
- 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
- Azapagic, A., Pettit, C., & Sinclair, P. (2007). A life cycle methodology for mapping the flows of pollutants in the urban environment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 9(3), 199–214. doi:10.1007/s10098-007-0092-9
- Azevedo L.B., Henderson A.D., van Zelm R., Jolliet O., Huijbregts M.A.J. (2013). Assessing the Importance of Spatial Variability versus Model Choices in Life Cycle Impact Assessment: The Case of Freshwater Eutrophication in Europe. *Envir. Sci. Technol.* 47, 13565-13570.
- Bengtsson, M., Carlson, R., Molander, S., & Steen, B. (1998). An approach for handling geographical information in life cycle assessment using a relational database. *Journal of Hazardous Materials*, 61(1-3), 67–75. doi:10.1016/S0304-3894(98)00109-5
- 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.
- Brandão M., Milà i Canals L. (2013). Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production. *Int J LCA* 18, 1243-1252.
- 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.
- Cousins, J. J., & Newell, J. P. (2015). A political–industrial ecology of water supply infrastructure for Los Angeles. *Geoforum*, 58, 38–50. doi:10.1016/j.geoforum.2014.10.011
- 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., Alkemade, R., Koellner, T. (2013b). Land use impacts on biodiversity in LCA : a global approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1216-1230. doi: 10.1007/s11367-012-0412-0
- 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
- EC (2010). *International Reference Life Cycle Data System – ILCD handbook. General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance First edition.* European Commission – Joint Research Centre.
- 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).
- Finnveden, G. & Nilsson, M. (2005). Site-dependent Life-Cycle Impact Assessment in Sweden. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(4), 235-239.
- 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
- Geyer, R., Stoms, D. M., Lindner, J. P., Davis, F. W., & Wittstock, B. (2010a). Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use – Part 1: Inventory modeling. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(5), 454–467. doi:10.1007/s11367-010-0170-9
- Geyer R., Lindner J. P., Stoms D. M., Davis, F. W., Wittstock B. (2010b). Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use – Part 2: Impact assessment. *Int J LCA* 15, 692-703.
- Hauschild M, Potting J. (2005). Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology. *Environmental News No. 80*, Danish Ministry of the Environment.
- 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.
- Humbert S., Marshall J.D., Shaked S., Spadaro J.V., Nishioka Y., Preiss P., McKone T.E., Horvath A., Jolliet O. (2011). Intake Fraction for Particulate Matter: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment. *Envir. Sci. Technol* 45, 4808-4816.
- Kier G., Mutke J., Dinerstein E., Ricketts T.H., Kueper W., Kreft H., Barthlott W. (2005). Global patterns of plant diversity and floristic knowledge. *J Biogeography* 32, 1107–1116
- 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.

- Langlois J., Fréon P., Steyer J.-P., Dedgenès J.-P., Hélas A. (2015). Sea use impact category in life cycle assessment: characterization factors for life support functions. *Int J LCA* 20, 970-981.
- Le Feon, S. & Aissani, L. (2015). Spatial differentiation? Yes, but, not only for the characterization! Conference paper, SETAC 2015, Barcelona (Spain).
- 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
- McKone, T.E., Nazaroff, W.W., Berck, P., Auffhammer, M., Limpan, T., Torn, M.S. et al (2011). Grand challenges for Life-Cycle Assessment of biofuels. *Envir. Sci. Technol.*, 45, 1751-1759.
- Müller-Wenk R., Brandão M. (2010). Climatic impact of land use in LCA-carbon transfers between vegetation/soil and air. *Int. J. LCA* 15 (2), 172-182.
- 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
- Nitschelm L., Corson M., Aubin J., Viaud V., Walter C. (2014). Utility of spatially explicit LCA for agricultural territories. 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.
- 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.
- Núñez M., Civit B., Muñoz P., Arena A.P., Rieradevall J., Antón A. (2010). Assessing potential desertification environmental impact in life cycle assessment – Part 1 : Methodological aspects. *Int J LCA* 15, 67-78.
- Núñez M., Pfister S., Vargas M., Antón A. (2015). Spatial and temporal specific characterisation factors for water use impact assessment in Spain. *Int J LCA* 20(1), 128-138.
- 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

- Potting J, Hauschild M. (2005). Background for Spatial Differentiation in LCA Impact Assessment — The EDIP2003 Methodology. Danish Ministry of the Environment; 2005.
- Potting, J. & Hauschild, M.Z. (2006). Spatial Differentiation in Life Cycle Impact Assessment. A decade of method development to increase the environmental realism of LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), 11-13.
- Pressman R. S. (1992). *Software Engineering: A Practitioner's Approach*, Third Edition. McGraw-Hill. Chapitre 10.
- Reyna, J. & Chester, M. (2013). Metropolitan-scale Building Infrastructure Environmental Life Cycle Assessment: Los Angeles' Embedded Impacts. SSEBE-CESEM-2013-WPS-004 Working Paper Series Arizona State University.
- Rodríguez C., Citroth 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.
- Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Joliet O., Juraske R., Koehler A., et al. (2008). USEtox-the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int. J. LCA* 13, 532–546.
- Roy P.-O., Deschênes L., Margni M. (2012b). Life Cycle Impact Assessment of Terrestrial Acidification: Modeling Spatially Explicit Soil Sensitivity at the Global Scale. *Envir. Sci. Technol.* 46, 8270-8278.
- 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.
- Roy P.-O., Huijbregts M., Deschênes L., Margni M. (2012a). Spatially-differentiated atmospheric source-receptor relationships for nitrogen oxides, sulfur oxides and ammonia emissions at the global scale for life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment* 62, 74-81.
- Saad R., Koellner T., Margni M. (2013). Land use impacts on freshwater regulation, erosion regulation, and water purification: a spatial approach for a global scale level. *Int J LCA* 18, 1253-1264.
- 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., Heeren, N., Jäggi, B., Waraich, R. a., & Hellweg, S. (2013). Housing and mobility demands of individual households and their life cycle assessment. *Environmental Science and Technology*, 47, 5988–5997. doi:10.1021/es304084p
- 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
- Scherer L., Venkatesh A., Karuppiah R., Pfister S. (2015). Large-Scale Hydrological Modeling for Calculating Water Stress Indices: Implications of Improved Spatiotemporal Resolution, Surface-Groundwater Differentiation, and Uncertainty Characterization. *Envir. Sci. Technol.* 49, 4971-4979.v
- Sohnen, J., Fan, Y., Ogden, J., & Yang, C. (2015). A network-based dispatch model for evaluating the spatial and temporal effects of plug-in electric vehicle charging on GHG emissions. *TRANSPORTATION RESEARCH PART D*, 38, 80–93. doi:10.1016/j.trd.2015.04.014
- Treeze Ltd (2014) Ecological Scarcity Method 2013 characterization factors and Google™ earth layer for water use scarcity retrieved from <http://treeze.ch/projects/methodology-development/life-cycle-impact-assessment/ecological-scarcity-method-2013/>.

Unamunzaga O., Besga G., Aizpurua A., Lafaga A., Armesto A.P., Arias N., et al. (2014). sigAGROAsesor: A software platform application to extend the use of sustainability indicators into agricultural systems. 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.

van Zelm R., Schipper A.M., Rombouts M., Snepvangers 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.

Wei B., Carlson R. (2003). Practical Pre-Study of GIS application with LCA database: SPINE. Presentation at the fifth international conference on Ecobalance, November 6–8, 2002. Tsukuba, Japan