



HAL
open science

Articulation d'un logiciel de simulation énergétique et d'un logiciel d'ACV à l'échelle quartier, illustration à travers une étude de cas

Adélaïde Mailhac, Nicolas Perez, Olivier Tournaire, Nicoleta Schiopu, Galdric Sibiude Sibiude, Luc Adolphe, Marion Bonhomme

► To cite this version:

Adélaïde Mailhac, Nicolas Perez, Olivier Tournaire, Nicoleta Schiopu, Galdric Sibiude Sibiude, et al.. Articulation d'un logiciel de simulation énergétique et d'un logiciel d'ACV à l'échelle quartier, illustration à travers une étude de cas. IBPSA (Conférence Francophone de l'International Building Performance Simulation Association), May 2016, Marne-la-Vallée, France. hal-02157301

HAL Id: hal-02157301

<https://hal.insa-toulouse.fr/hal-02157301>

Submitted on 16 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Articulation d'un logiciel de simulation énergétique et d'un logiciel d'ACV à l'échelle quartier, illustration à travers une étude de cas

Adélaïde Mailhac^{*1,2,3}, Nicolas Perez¹, Olivier Tournaire^{1,3}, Nicoleta Schiopu^{1,3}, Galdric Sibiude^{1,3}, Luc Adolphe^{3,4}, Marion Bonhomme⁴

¹ Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), France

² Université Toulouse, INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), Toulouse, France

³ Efficacity-Institut de R&D pour la transition énergétique de la ville, Champs-sur-Marne, France

⁴ Université Toulouse, ENSA, Laboratoire de Recherche en Architecture (LRA), Toulouse, France

*adelaide.mailhac@cstb.fr

RESUME. A travers une étude de cas, ce papier présente les plus-values décisionnelles apportées par le couplage étude énergétique – ACV – méthode d'aide à la décision multicritère dans le processus de conception d'un projet urbain. Dans cette chaîne de simulation multi-modèle, le rôle de la maquette numérique au format standard CityGML est central et assure l'interopérabilité des outils. Ce travail est basé sur l'étude des performances de plusieurs variantes d'un projet de quartier en région Parisienne. L'étude repose sur une modélisation du projet sous forme d'une maquette numérique au format CityGML permettant de coupler les simulations énergétiques réalisées avec l'outil DIMOSIM (District Modeller and Simulator) et d'évaluer les performances environnementales grâce à l'outil ELODIE (logiciel d'ACV bâtiments). Les résultats obtenus permettent de comparer finement les variantes du projet à l'aune d'une dizaine d'indicateurs environnementaux. Pour accompagner l'interprétation de ces résultats, la méthode ATLAS, méthode d'aide à la décision multicritère, a été utilisée et permet de réduire à un seul index les résultats de l'ACV, aboutissant ainsi à un classement exhaustif des variantes envisagées.

MOTS-CLÉS : Simulation énergétique, ACV, Maquette Numérique Urbaine

ABSTRACT. Through a case study, this paper presents knowledge gains made by coupling Energy study – LCA – multiple Criteria Decision Aiding method. To do so, the digital model in a standard format is essential and supports the interoperability of simulation tools. The work presented here is based on the study of different alternatives of a project located in the Paris region. This comparison is based on a digital model of the project in the CityGML format allowing to couple energy simulations performed with the tool DIMOSIM (District Modeller and Simulator) and environmental performance assessment made with ELODIE (a building LCA software). Obtained results allow fine comparison of simulated alternatives in the light of nine environmental indicators. To support the interpretation of these results, the ATLAS method, a multiple Criteria Decision Aiding method, is used and reduces the LCA results to a single index, resulting in a comprehensive ranking of simulated alternatives.

KEYWORDS: Energetic simulation, LCA, digital model

1. INTRODUCTION

Lieu de concentration de la population et des activités économiques, les villes sont de fait un lieu majeur de consommation énergétique. Selon un rapport des Nations Unies, elles sont à l'origine de 40 à 70% des émissions de gaz à effet de serre et consomment près de 70% de l'énergie mondiale (principalement dû aux secteurs du transport et du bâtiment) (UN-HABITAT 2011). Les actions à

l'échelle urbaine sur les bâtiments et les transports offrent ainsi des leviers d'actions d'envergure pour atteindre les objectifs nationaux de la transition énergétique et écologique.

Parallèlement, dans les projets d'aménagement urbain, les thématiques environnementales et énergétiques sont devenues prégnantes. Au regard des enjeux (e.g. changement climatique) et de la complexité des systèmes urbains, il est nécessaire que les outils pour évaluer les performances énergétiques et environnementales d'un projet urbain soient basés sur :

- Une modélisation physique du quartier,
- Une approche multicritère pour éviter les transferts de pollution entre impacts environnementaux,
- Une perspective cycle de vie pour éviter les transferts de pollution entre phases de cycle de vie.

Pour l'étude des bâtiments à l'échelle d'un quartier, l'association de la simulation énergétique et de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) permet de répondre à ces critères. Depuis quelques années, certains outils matures à l'échelle bâtiment ont été développés et appliqués à l'échelle urbaine (Popovici and Peuportier 2004; Schioppa et al. 2014). Bien que ces outils se basent sur des méthodes reconnues comme pertinentes pour l'évaluation des performances environnementales, peu d'acteurs les utilisent effectivement dans leur exercice professionnel. Cette étude propose plusieurs pistes pour faciliter l'intégration de la simulation et de l'évaluation des performances environnementales dans le processus de conception urbaine.

A travers une étude de cas, nous présentons le couplage d'un modèle de simulation énergétique quartier avec un outil d'ACV bâtiments. L'interopérabilité entre ces modèles experts est renforcée par la mise en œuvre d'une maquette numérique au format standard CityGML du projet étudié. Et l'interprétation des résultats issus du couplage simulation énergétique-ACV est facilitée par l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritères (MADMC).

2. PRINCIPE DE LA MODELISATION MULTI-OUTILS

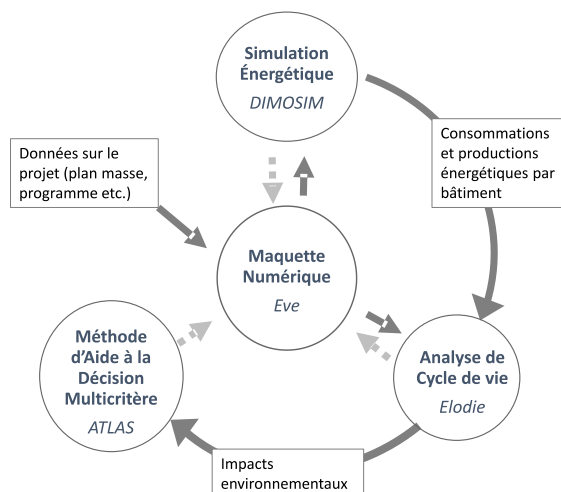


Figure 1: Chaîne d'outils pour évaluer les performances environnementales d'un quartier

Comme indiqué figure 1, les données relatives au projet (plan masse ou plan directeur) sont stockées dans une maquette numérique. Pour cette étude nous avons utilisé la plateforme Eve du CSTB (www.decision3d.com/techno.html). Il s'agit d'un démonstrateur logiciel qui permet d'exploiter une maquette numérique centrale au format CityGML (Kolbe, Gröger, & Plümer, 2005). Ce format, qui est un standard, présente l'avantage d'être un format libre et ouvert et donc potentiellement exploitable par un grand nombre de logiciel

métier (Lebègue and Celnik 2014). Il permet de stocker à la fois l'information géométrique et sémantique des objets urbains. Dans le cas des bâtiments, ces informations peuvent par exemple être les propriétés des parois (e.g. ratio de surfaces vitrées, valeurs U etc.). Des extensions spécifiques à certains métiers, notamment à l'énergie (Nouvel, et al., 2015) sont en cours de développement et permettent un enrichissement du format de base, permettant ainsi de spécialiser l'information et de définir différents niveaux de granularité. Ainsi, la maquette numérique permet à la fois de fournir des données d'entrée aux outils de calcul, mais aussi de stocker les résultats issus des simulations. Sur la figure 1, les flèches allant des logiciels de simulation vers la maquette numérique indiquent la possibilité de stocker et d'afficher les résultats de simulation dans l'environnement de la maquette.

Une fois la maquette numérique créée, les données sur les bâtiments (localisation, géométrie et éventuellement la composition et la performance de leur enveloppe) sont transmises au logiciel de simulation énergétique quartier. Ici, nous avons utilisé la plateforme de simulation dynamique DIMOSIM (District Modeller and Simulator). Cette plateforme a été développée au sein du CSTB (Riederer et al. 2015) pour modéliser et simuler l'ensemble des flux énergétiques d'un quartier prenant en compte: les consommations liées aux bâtiments (besoins thermiques et électriques, interactions avec leur environnement), les systèmes de production et de stockage d'énergie (locaux et décentralisés) et les réseaux de distribution (électrique et thermique).

Les résultats de la simulation énergétique ainsi que les données sur les bâtiments (métrés) sont ensuite compilées dans un logiciel d'ACV pour évaluer les performances environnementales des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie. Nous avons utilisé ELODIE (www.elodie-cstb.fr), outil conçu pour réaliser l'ACV des bâtiments conformément à la. Dans les travaux présentés ici, le périmètre de l'ACV est limité à l'évaluation des impacts liés (1) aux produits de construction (fabrication, mise en œuvre, maintenance et fin de vie) et (2) à l'utilisation d'énergie durant la vie en œuvre du bâtiment. Les indicateurs d'impacts environnementaux évalués sont listés dans le tableau 1. Ils ont été choisis parmi les indicateurs recommandés par la norme En 15 978 (Comité Européen de Normalisation 2012).

Indicateurs environnementaux	Abréviation	Unité
Consommation totale d'Energie primaire	E primaire tot	kWh
Consommation d'Energie Primaire non renouvelable	E non renouv.	kWh
Changement climatique	CC	kg équivalent CO ₂
Consommation d'eau	Eau	L
Production de Déchets dangereux	D dang.	Kg
Production de Déchets non dangereux	D non dang.	Kg
Production de Déchets radioactifs	D rad.	Kg
Acidification atmosphérique	Acid. Atm.	kg équivalent SO ₂
Formation d'ozone photochimique	Ozone Photo.	kg équivalent éthylène

Tableau 1 : Indicateurs environnementaux

Enfin dans le cas où l'on cherche à comparer plusieurs variantes d'un même projet, une MADMC est utilisée pour effectuer le tri et le classement de ces variantes. Dans la littérature, on trouve plusieurs exemples du couplage ACV – MADMC (Hermann, Kroeze, and Jawjit 2007; Linkov and Seager 2011; Karmperis et al. 2013) utilisé pour pondérer et additionner les résultats de l'ACV en un seul index. Ici, nous avons utilisé la méthode ATLAS, cette méthode de surclassement décrite dans (Perez et al. 2016) est une méthode hybride entre les méthodes PROMETHEE II et ELECTRE III. ATLAS permet d'obtenir le classement des configurations simulées à partir de (1) l'ensemble des scores de chaque

configuration issus de l'ACV (i.e. les valeurs d'impacts environnementaux) et (2) la pondération des critères environnementaux.

3. CAS D'ETUDE

Le cas d'étude choisi porte sur une portion du projet d'aménagement du boulevard du Ru de Nesles à Champs-sur-Marne. Ce projet est prévu dans le cadre de l'arrivée du Grand Paris Express. Le périmètre de l'étude est d'une surface de 4ha et inclut 7 îlots. Au moment de l'étude, le projet est en phase programmation et prévoit la construction de 25 bâtiments (logements, bureaux, commerces), le réaménagement et la construction de routes et d'espaces publics.

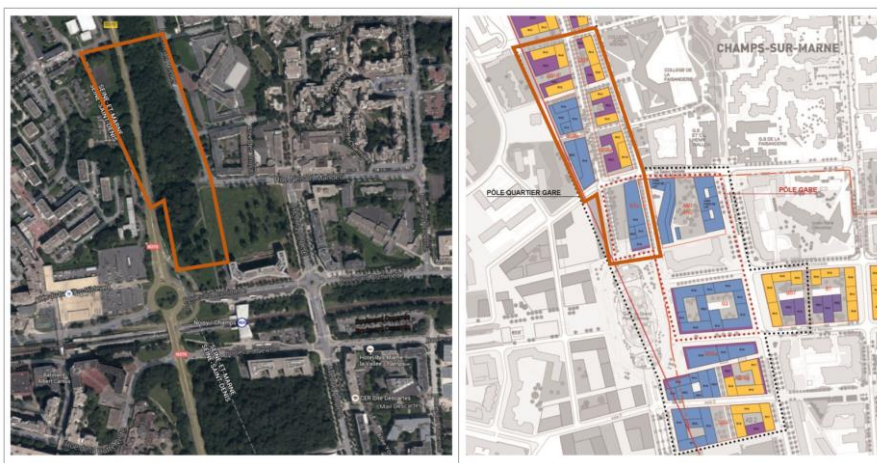


Figure 1: En orange: périmètre de l'étude de cas: état actuel (à gauche) et projet (à droite)

L'Établissement Public d'Aménagement (EPA) Marne-la-Vallée, maître d'ouvrage de l'opération, souhaite que le projet respecte les principes du développement durable, notamment en termes de qualité environnementale. Conformément à cet objectif, nous avons simulé 8 variantes du projet avec différents niveaux de performances énergétiques choisis raisonnablement (voir tableau 2).

Configuration	Production d'énergie	Couverture PV	Isolation (U en W/ m ² K)	Vitrages (U en W/ m ² K)
1	Chaudière sans condensation	10 %	Intérieure U=0,4	Triple U=1
2	Chaudière sans condensation	10 %	Extérieure U=0,2	Triple U=1
3	Chaudière à condensation	20 %	Intérieure U=0,2	Double U=2
4	Chaudière à condensation	10 %	Extérieure U=0,4	Double U=2
5	Pompe à chaleur (air/eau)	20 %	Intérieure U=0,4	Triple U=1
6	Pompe à chaleur (air/eau)	40 %	Extérieure U=0,2	Double U=2
7	Cogénération (strirling)	20 %	Extérieure U=0,4	Double U=2
8	Géothermie (aquifère)	10 %	Intérieure U=0,2	Double U=2

Tableau 2 : Caractéristiques des configurations

Enfin toutes les variantes modélisées ont le même mode constructif : une structure voile béton (épaisseur 20cm) isolée avec de la laine minérale (caractéristiques reportées dans le tableau 2). Pour les planchers intermédiaires nous avons modélisés des dalles de béton d'épaisseur 20 cm.

3.1. PRINCIPALES HYPOTHESES DE SIMULATION

Les principales hypothèses utilisées pour la simulation énergétique découlent de la description du cas d'étude dans la section précédente. Pour la prise en compte de l'inertie thermique, nous considérons que les séparations internes verticales occupent 5% de la surface de plancher et sont en béton.

Les principales hypothèses utilisées pour réaliser l'ACV du projet sont détaillées ci-après :

- La durée d'analyse choisie est de 50 ans.
- Pour évaluer les impacts liés à la mise à disposition des bâtiments nous distinguons :
 - a. Les éléments faisant partis de l'enveloppe du bâtiment et les planchers intermédiaires. Les quantités (surfaces ou volumes) de ces éléments sont évaluées par la maquette numérique. Ils sont paramétrés pour correspondre aux hypothèses décrites dans la section précédente. La base de données ELODIE permet de calculer leurs impacts.
 - b. Les autres éléments du bâtiment (escaliers, équipements etc.). Pour ces éléments, en phase programmation d'un projet, nous ne disposons pas d'informations permettant de les décrire finement. Leurs impacts sont estimés à partir de ratios issus de la capitalisation sur les résultats d'ACV pour différentes typologies de bâtiments (Lebert et al. 2013). Dans une première approche les éléments de séparation interne verticaux ne sont pas pris en compte.
- Enfin pour évaluer les impacts liés à l'utilisation d'énergie durant la vie en œuvre des bâtiments, les résultats de consommation issus de DIMOSIM sont associés à des vecteurs d'impacts environnementaux. La production d'énergie locale est prise en compte conformément à la norme EN 15 978 (Comité Européen de Normalisation 2012).

Pour utiliser la méthode ATLAS, nous avons regroupé et classé par ordre de priorité les critères environnementaux (voir tableau 3 ligne 1).

Pondération	E non renouv. CC	E primaire tot Eau, D rad.	D dang. D non dang.	Acid. Atm. Ozone photo.
Logarithmique	0,149	0,128	0,099	0,059
Linéaire	0,19	0,13	0,08	0,03
Exponentielle	0,26	0,11	0,05	0,02

Tableau 3 : Pondérations des critères environnementaux

Ce classement a été choisi pour correspondre à ce que pourrait être les priorités environnementales d'un aménageur en France. La méthode ATLAS a ensuite été appliquée suivant les trois méthodes de pondération proposées par ATLAS (voir tableau 3) et avec les fonctions de surclassement de type linéaire.

4. RESULTATS

Les résultats issus de l'ACV présentés dans de la figure 3 permettent de comparer les performances relatives des 8 configurations à l'aune de chaque indicateur. Ces résultats apportent de nombreuses informations. Par exemple, sur l'indicateur changement climatique les configurations 5, 6 et 8 présentent les meilleures performances (-40% par rapport à la configuration 1). Pour ces trois configurations, l'énergie nécessaire pour chauffer les bâtiments est issue de sources renouvelables : PAC et géothermie où seul le fonctionnement des systèmes nécessite de l'électricité. Le mix électrique français étant largement issu du nucléaire (à environ 78%) les solutions « renouvelables » telles que les configurations

5, 6 et 8 sont relativement peu émettrices de gaz à effet de serre (GES). Les autres configurations modélisées sont des solutions « gaz », donc plus fortement émettrices de GES. A l'inverse, au regard de l'indicateur production de déchets nucléaires, les performances des variantes 5, 6 et 8 sont les moins bonnes.

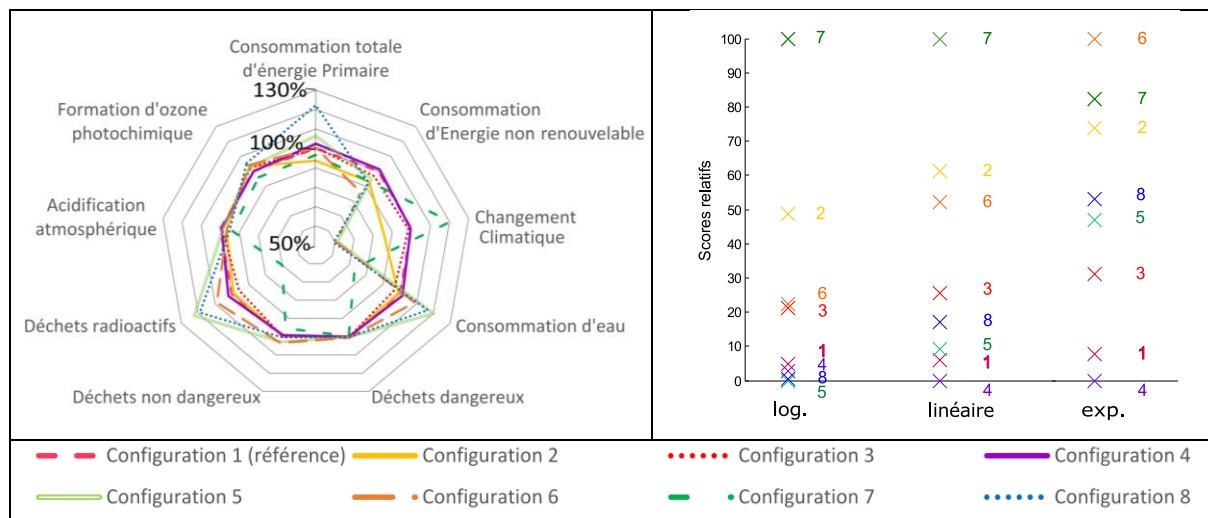


Figure 2 (à gauche) : résultats d'ACV

Figure 4 (à droite) : Classements ATLAS

De fait, aucune des configurations n'est meilleure sur l'ensemble des critères. Un post traitement des résultats utilisant la méthode ATLAS a permis de trier et classer les variantes. Nous concentrons d'abord notre analyse sur les résultats obtenus avec la pondération logarithmique. Avec cette pondération, le poids des critères décline faiblement avec leur ordre de priorité. Ainsi tous les critères ont leur importance dans les résultats, c'est pourquoi nous préférons ce type de pondération.

Les résultats figure 4 montrent que la configuration 7, caractérisée par la mise en œuvre d'un système de cogénération, est la meilleure parmi celles modélisées. Bien que cette configuration soit la moins bonne sur l'aspect changement climatique, elle obtient de bons résultats sur les autres indicateurs, ce qui lui permet de se classer 1^{ère}. Par ailleurs, l'application d'ATLAS avec la fonction logarithmique fait ressortir des cas d'incomparabilité entre les paires de configurations (1/8), (3/6) et (4/8), ce qui indique pour ces paires que les qualités de l'une ne peuvent compenser ses défauts au regard de l'autre et inversement.

Avec la fonction linéaire, les résultats aboutissent au même classement pour les quatre premières configurations (7, 2, 6 et 3), avec toutefois des écarts moins importants. Avec une pondération exponentielle, les indicateurs changement climatique et énergie non renouvelable sont prépondérants. La configuration 6, qui présente les meilleures performances ACV sur ces deux indicateurs, se classe 1^{ère} devant les configurations 7 et 2.

Enfin, pour chaque configuration, il est possible de représenter graphiquement dans l'environnement maquette numérique les résultats issus de l'ACV ou de la simulation énergétique. A titre d'exemple, nous présentons dans les figures 5 et 6, la visualisation de l'impact Changement Climatique pour les deux configurations 7 et 2 respectivement 1^{ère} et 2^{ème} dans les classements obtenus par la méthode ATLAS suivant les pondérations logarithmique et linéaire.

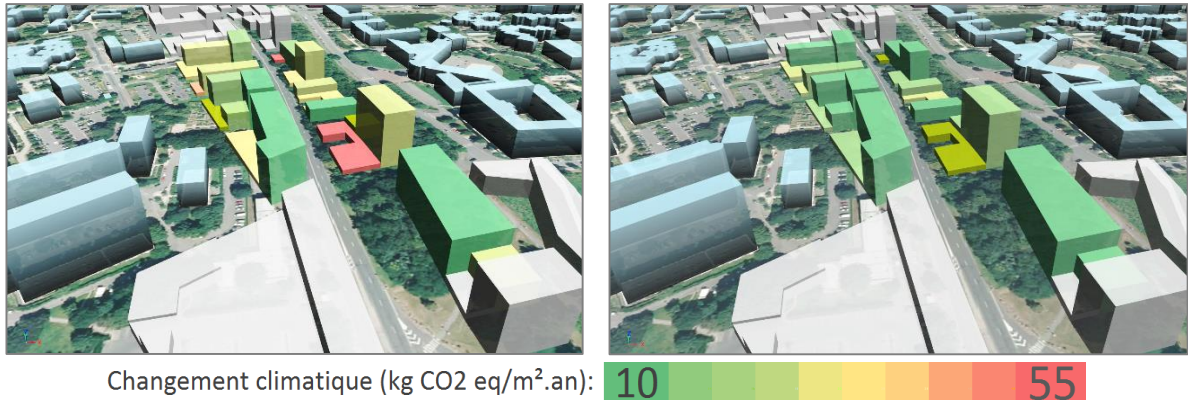


Figure 5 et 6: Impact Changement Climatique pour les configurations 7 (à gauche) et 2 (à droite)

5. DISCUSSION ET CONCLUSION

A l'échelle du quartier le couplage de l'ACV avec la simulation énergétique permet de prendre en compte l'influence de l'environnement et de la forme urbaine sur les performances des bâtiments, par exemple via la prise en compte des ombres portées en énergétique. Ce couplage permet également de modéliser et évaluer les mutualisations possibles entre bâtiments, par exemple la mutualisation des systèmes énergétiques et d'infrastructures. Du point de vue d'un non-expert, les résultats d'ACV peuvent être complexes à interpréter, ce qui peut limiter leur influence dans un processus décisionnel. En résumant les résultats d'ACV en un seul index, l'utilisation d'une méthode d'aide à la décision multicritères peut faciliter l'interprétation et l'utilisation des résultats d'ACV. L'exemple présenté ici a démontré qu'à partir de résultats d'ACV où aucune variante n'était meilleure sur l'ensemble des critères environnementaux, l'application de la méthode ATLAS a permis de sélectionner la variante n°7 comme meilleure au regard des priorités du décideur et selon une pondération logarithmique. Toutefois les résultats varient en fonction des priorités du décideur (Karmperis et al. 2013) et de la méthode de pondération des critères choisie comme nous l'avons montré ici. Enfin l'étude de cas présentée ici a permis d'illustrer quelques-uns des apports de la maquette numérique dans le processus de simulation multi-outils. La maquette permet de stocker et gérer de nombreuses données relatives au projet et qui peuvent être communes à plusieurs outils. Pour cela l'utilisation d'un format standard de maquette numérique est recommandée. En addition, la représentation graphique 3D des résultats a pour objectif de faciliter la communication avec des acteurs non professionnels (citoyen, élu, futurs usagers etc.) et ainsi favoriser l'appropriation et la compréhension du projet par le plus grand nombre très tôt dans le processus de conception. A ce titre, les modes de représentations des résultats représentent un enjeu important et une piste de travail de futures recherches.

Pour l'étude présentée ici, le couplage simulation énergétique–ACV–MADMC a permis d'évaluer les performances environnementales de plusieurs variantes d'un même projet pour finalement aboutir à un classement de ces variantes du point de vue environnemental. Les résultats de cette étude peuvent s'exprimer de plusieurs manières pour s'adapter au public concerné : des résultats détaillés de simulation pour une analyse technique, un score unique en vue d'une prise de décision par un jury ou une visualisation 3D des résultats pour une revue de projet visant un public large. Dans un contexte environnemental de plus en plus tendu, la simulation multi-outils proposée ici a pour objectif de renforcer la prise en compte des enjeux environnementaux dans les projets d'aménagement urbain.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Efficacity (www.efficacity.com) qui a permis d'initier ces travaux et l'EPA-Marne-la-Vallée qui a fourni l'essentiel des données utilisées pour l'étude de cas.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Comité Européen de Normalisation. 2012. "Norme EN 15978; Contribution Des Ouvrages de Construction Au Développement Durable - évaluation de La Performance Environnementale Des Bâtiments- Méthode de Calcul."
- DEE/EICV, CSTB. 2015. "Guide méthodologique_ELODIE." March. [http://www.elodie2-cstb.fr/Documentation/Guide méthodologique_ELODIE_Mars_202015.pdf](http://www.elodie2-cstb.fr/Documentation/Guide_méthodologique_ELODIE_Mars_202015.pdf).
- Hermann, B. G., C. Kroeze, et W. Jawjit. 2007. "Assessing Environmental Performance by Combining Life Cycle Assessment, Multi-Criteria Analysis and Environmental Performance Indicators." *Journal of Cleaner Production* 15 (18): 1787–96. doi:10.1016/j.jclepro.2006.04.004.
- Karmperis, Athanasios C., Konstantinos Aravossis, Ilias P. Tatsiopoulos, et Anastasios Sotirchos. 2013. "Decision Support Models for Solid Waste Management: Review and Game-Theoretic Approaches." *Waste Management* 33 (5): 1290–1301. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.017.
- Kolbe, Thomas H., Gerhard Gröger, et Lutz Plümer. 2005. "CityGML – Interoperable Access to 3D City Models". *Proceedings of the Int. Symposium on Geo-information for Disaster Management, Delft*.
- Lebègue, Eric, and Olivier Celnik. 2014. *BIM & maquette numérique : Pour l'architecture, le bâtiment et la construction*. Paris, Marne-la-Vallée: Eyrolles.
- Lebert, Alexandra, Sébastien Lasvaux, Francis Grannec, Sylviane Nibel, Fanny Achim, and Nicoleta Schiopu. 2013. "Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance. Analyse Statistique Action 22."
- Linkov, Igor, and Thomas P. Seager. 2011. "Coupling Multi-Criteria Decision Analysis, Life-Cycle Assessment, and Risk Assessment for Emerging Threats." *Environmental Science & Technology* 45 (12): 5068–74. Doi:10.1021/es100959q.
- Nouvel, Romain, Jean-Marie Bahu, Robert Kaden, Jerome Kaempf, Piergiorgio Cipriano, Moritz Lauster, Karl-Hainz Haefele, Esteban Munoz, Olivier Tournaire, et Egbert Casper. 2015, "Development of the CityGML Application Domain Extension Energy for Urban Energy Simulation". *Fourteenth International IBPSA Conference: 559-564*.
- Perez, Nicolas, Adélaïde Mailhac, Christian Inard, Peter Riederer. 2016. "Outil d'aide à la décision multicritère pour la conception de systèmes énergétiques à l'échelle du quartier". *Conférence IBPSA France 2016*.
- Popovici, Emil, and Bruno Peuportier. 2004. "Using Life Cycle Assessment as Decision Support in the Design of Settlements." *In Proceedings of the 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 19–22. <http://alexandria.tue.nl/openaccess/635611/p0664final.pdf>.
- Riederer, Peter, Vincent Partenay, Nicolas Perez, Christophe Nocito, Romain Trigance, Thierry Guiot. 2015. "Development of a Simulation Platform for the Evaluation of District Energy System Performances". *Fourteenth International IBPSA Conference: 2499-2506*.
- Schiopu, Nicoleta, Adélaïde Mailhac, Didier Beloin-Saint-Pierre, Sébastien Lasvaux, Galdric Sibiude, et Jacques Chevalier. 2014. "A Hybrid Methodology for the Environmental Assessment of Anthropogenic Systems in Urban Areas." *Conférence Sustainable Buildings 2014, Barcelone*.
- UN-HABITAT. 2011. "Global Report on Human Settlements 2011: Cities and Climate Change." United Nations Human Settlements Program, Earthscan.