

Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée à l'étude d'une maison individuelle

Charlotte Roux*¹, Patrick Schalbart¹, Bruno Peuportier¹

¹ MINES ParisTech, PSL – Research University, CES – Centre pour l'efficacité énergétique des systèmes

*charlotte.roux@mines-paristech.fr

RESUME. L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode de plus en plus utilisée dans le secteur du bâtiment, en particulier pour l'aide à la conception. Les études d'ACV sont classées en deux grandes familles : l'approche attributionnelle (ACV-A) et l'approche conséquentielle (ACV-C). Les études ACV-A allouent une responsabilité environnementale au cycle de vie du produit étudié (e.g. l'impact d'un bâtiment). L'ACV-C se focalise sur les conséquences environnementales d'une décision (e.g. décision de construire un nouveau bâtiment). Ceci influence la réalisation de l'étude, notamment au niveau des données utilisées et des techniques d'allocations employées (allocation ou extension du système). Cette communication propose une comparaison entre ACV-A et ACV-C sur un cas d'étude simple : une maison individuelle passive située près de Chambéry. Les différences entre les deux approches sont importantes et peuvent affecter le classement de variantes de conception. Les deux approches sont discutées en fonction de leur apport concernant un objectif d'éco-conception.

MOTS-CLÉS : Analyse du cycle de vie, Éco-conception, Bâtiments

ABSTRACT. Life cycle assessment (LCA) is increasingly used in green building design. LCA studies are usually classified in two categories: attributional LCA (ALCA) and consequential LCA (CLCA). ALCA allocates environmental burden to the life cycle of a product or service (e.g. environmental impact of a building) whereas CLCA focuses on the environmental consequences of a decision (e.g. consequences of the decision to construct a new building). This affects the study process, leading to different choices for production data (average versus marginal production data) and to different choices concerning the allocation procedure (allocation versus system expansion). This paper presents a comparison between ALCA and CLCA using an energy-efficient single family house located near Chambéry. Discrepancies between the two approaches are important and may change the ranking of design alternatives. Consistency of ALCA and CLCA is discussed regarding an eco-design objective.

KEYWORDS : Life cycle assessment, Eco-design, Buildings

1. INTRODUCTION

La méthode ACV est aujourd'hui de plus en plus répandue dans le secteur de la construction (Chevalier 2009). Elle peut être appliquée à différents objectifs : en aide à la conception, aide à la rénovation, aide à la gestion, certification (Zabalza et al. 2009). Des projets européens comme REGENER se sont attachés à définir une méthodologie spécifique pour prendre en compte les particularités de ce secteur (Peuportier 2001).

Le logiciel novaEQUER (anciennement EQUER) a été développé pour modéliser le cycle de vie des bâtiments depuis l'étape de construction jusqu'à la démolition en passant par la vie en œuvre et les étapes de rénovation (Polster et al. 1996 ; Peuportier et al. 2013). Il est chaîné à l'outil de simulation

thermique dynamique COMFIE (Peuportier et Blanc Sommereux, 1990). Il évalue 12 indicateurs environnementaux, listés dans le Tableau 1.

Indicateurs	Unité	Facteur de normalisation (unité/hab/an)
Energie Primaire (CED)	GJ	177,9
Consommation d'eau (W)	m ³	339,0
Epuisement des ressources abiotiques (ADP)	kg Sb-eq	32,6
Production de déchets non-radioactifs (NRW)	t eq	10,4
Production de déchets radioactifs (RW)	dm ³	0,5
Potentiel de réchauffement global (GWP 100)	t CO ₂ -eq	8,7
Potentiel d'acidification (AP)	kg SO ₂ -eq	62,3
Potentiel d'eutrophisation (EP)	kg PO ₄ -eq	38,1
Domage à la biodiversité (BD)	PDF.m ² .yr	13700
Domage à la santé humaine (HD)	DALY	0,01
Formation d'ozone photochimique (POP)	kg C ₂ H ₄ -eq	19,7
Odeur (O)	Mm ³	-

Tableau 1 : Indicateurs environnementaux du logiciel novaEQUER.

Les études ACV sont généralement classées en deux grandes familles dans la littérature : l'approche attributionnelle (ACV-A) et l'approche conséquentielle (ACV-C) qui permettent de répondre à différents objectifs (Halvgaard et al. 2012). L'approche attributionnelle cherche à allouer une part de responsabilité à un système donnée alors que l'approche conséquentielle cherche à modéliser les conséquences environnementales d'une décision.

Cette communication propose une comparaison entre ACV-A et ACV-C sur un cas d'étude simple : une maison individuelle passive située près de Chambéry. Après une présentation des hypothèses méthodologiques caractérisant les deux approches, le cas d'étude est présenté et deux options de conception sont évaluées : le choix d'un mode constructif, béton banché ou ossature bois et la décision d'installer des panneaux photovoltaïques. Ceci permet d'analyser les conséquences du choix d'une approche ACV-A ou ACV-C en terme d'aide à la décision en phase de conception amont d'un projet.

2. ACV-A ET ACV-C

Les principales différences entre ACV-A et ACV-C sont détaillées dans les travaux de Brander et al. (2008). Elles concernent notamment l'objectif de l'étude, les frontières du système étudiés, le type de données utilisées, les méthodes d'allocations et la prise en compte d'effets indirects hors du cycle de vie considéré. Les différences prises en compte dans l'étude exposée ici sont listées dans le Tableau 2 et explicitées brièvement dans les paragraphes suivants.

	ACV-A	ACV-C
Objectif de l'étude	Certification/statuquo	Aide à la décision
Frontières du système	Cycle de vie, chaine de valeur étudiée	Ensemble des conséquences liées à la décision prise
Données utilisées	Moyennes	Marginales
Allocations	Allocations / coproduit	Expansion du système / Impacts évités
Carbone biogénique	Bilan neutre	Bilan différencié
Fin de vie	Méthode des stocks	Méthode des impacts évités

Tableau 2 : Principales différences méthodologiques entre ACV-A et ACV-C

2.1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

L'ACV-A est principalement associée à des objectifs de certification, de diagnostic de l'existant, d'évaluation d'une situation existante et figée. A contrario l'ACV-C est orientée vers des objectifs d'évolution d'un système, d'analyse de politiques publiques, d'aide à la décision (Earles et Halog 2011).

2.2. FRONTIERES DU SYSTEME ETUDIE ET ALLOCATIONS

En ACV-A, les frontières du système étudié se limitent précisément à la chaîne de valeur permettant de réaliser le produit ou service étudié. En ACV-C, le système étudié inclut (dans la mesure du possible) les éléments affectés par la décision prise. La principale implication méthodologique de cette différence est l'intégration d'impacts évités en ACV-C. Par exemple, si de l'électricité est produite en surplus par le bâtiment, elle est envoyée vers le réseau où elle sera consommée dans d'autres bâtiments. En ACV-A, l'électricité exportée n'est pas incluse dans les frontières du système. Les impacts de la fabrication, maintenance et fin de vie des panneaux photovoltaïques sont par ailleurs alloués au bâtiment au prorata de l'énergie auto-consommée. En ACV-C, l'intégralité des impacts liés aux équipements est affectée au bâtiment mais on comptabilise également des impacts « évités » liés à l'export d'électricité vers le réseau. Cet export permet au réseau de ne pas produire d'électricité, ce qui évite des impacts, bénéfique qui est associé au projet de bâtiment étudié.

2.3. DONNEES MOYENNES VS DONNEES MARGINALES

L'estimation des impacts dans une situation de *statu quo* figée telle que modélisée en ACV-A requiert l'utilisation de données moyennes de production, alors que les conséquences d'un changement, d'une évolution de l'existant seront mieux représentées par des données marginales en ACV-C. Ceci implique par exemple que sur un marché où plusieurs technologies sont en concurrence (e.g. marché des métaux entre filière vierge et filière de recyclage, marché de l'électricité, de la chaleur sur un réseau urbain), l'ACV-A utilisera le mix moyen de production des technologies et l'ACV-C va chercher à déterminer la ou les technologies en mesure d'ajuster la production (e.g. technologie la moins chère pouvant répondre à une hausse de la demande).

2.4. PRISE EN COMPTE DU CARBONE BIOGENIQUE

Deux types de méthodes existent pour la prise en compte du carbone biogénique en ACV :

- Bilan nul : la fixation du carbone durant la croissance végétale et la libération du carbone biogénique en cas d'incinération peuvent être exclues du comptage des émissions de CO₂, en considérant que ce qui a été stocké sera émis plus tard.
- Bilan différencié : plusieurs chercheurs préconisent plutôt un traitement différencié du carbone biogénique selon les différentes phases du cycle de vie (Rabl et al. 2007). Ceci permet de tenir compte de la provenance du bois (forêt gérée durablement ou non) et des différentes options de fin de vie (décharge, valorisation énergétique ou matière...).

On associe dans cette étude le bilan neutre à l'ACV-A et le bilan différencié à l'ACV-C. En effet, le bilan différencié considère les conséquences suite à l'utilisation de bois : si et seulement si la forêt est bien gérée (bois certifié), alors un arbre sera replanté. Ensuite, si le bois est incinéré avec ou sans valorisation énergétique, ou si il est mis en décharge, les conséquences en termes d'impacts seront différentes. En ACV-A on examine un état existant : le bois a effectivement stocké du CO₂ durant sa

croissance. Le bilan neutre permet de tenir compte du risque important de réémission de ce carbone en fin de vie.

2.5. BASES DE DONNEES DISPONIBLES

La dernière version de la base de données ACV ecoinvent (v3) est disponible sous trois approches de modélisation des inventaires : « cut-off », « allocation au point de substitution (APOS) », et « conséquentielle ». La version « cut-off » correspond à une approche de stock, où le producteur est responsable des déchets qu'il produit et ne peut être crédité d'aucun bénéfice sur un éventuel recyclage. Ceci correspond à la modélisation ACV-A. L'approche APOS correspond à une approche où un bénéfice peut être comptabilisé dans le cas où un produit est recyclé. La troisième version « conséquentielle » modélise les effets à long terme d'un changement de la demande. Elle est recommandée par ecoinvent pour les seules études prospectives. Le système APOS est retenu pour l'ACV-C dans le cas présenté ici car l'objectif n'est pas d'effectuer une étude prospective.

3. PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

3.1. DESCRIPTION DES MAISONS INCAS

Quatre maisons de taille et de géométrie équivalente ont été construites sur la plateforme expérimentale INCAS, de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES), située près de Chambéry. Elles diffèrent seulement par leur mode constructif : béton banché, double mur, ossature bois ou brique. Ces maisons ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dont les rapports e, fournissent une description précise (CEA, 2010 ; Pannier 2014).



Figure 1 : Aperçu des maisons INCAS

Les maisons INCAS ont une surface habitable de 90 m². Aucun masque proche n'est considéré. Les données météorologiques utilisées pour la simulation thermique sont celles de la réglementation thermique 2012. Chambéry correspond à la zone thermique H2c, représentée par la ville de Mâcon.

Dénomination	Composition des murs	Remarques
I-BB	Béton Banché : enveloppe en béton et isolation par l'extérieur avec du polystyrène extrudé	Inertie lourde
I-OB	Ossature Bois et laine de bois pour l'isolation	Inertie moyenne

Tableau 3 : Composition des maisons Ossature bois (I-OB) et Béton Banché (I-BB)

Les épaisseurs d'isolants ont été calculées afin d'avoir une résistance thermique équivalente dans les deux maisons. Les ponts thermiques considérés sont ceux donnés dans le référentiel de la réglementation thermique 2012. Le système solaire pouvant être installé en option comprend 39,3 m² de panneaux photovoltaïques polycristallins installés en surimposition sur la toiture, orientés sud et inclinés à 26,5°. On fait l'hypothèse que la maison est occupée par une famille comprenant deux

adultes et deux enfants. Afin de se rapprocher de scénarios les plus réalistes possibles, on utilise les travaux réalisés par Vorger (2014) sur le comportement des habitants dans les bâtiments pour modéliser les apports internes (puissance dissipée, chaleur métabolique).

3.2. HYPOTHESES DE MODELISATION ACV

Le transport quotidien des habitants et la gestion des déchets ménagers sont exclus de cette étude qui se concentre sur l'aide à la conception des bâtiments. La durée de vie de la maison est estimée à 80 ans, les équipements ont une durée de vie supposée de 20 ans, les menuiseries de 30 ans et les revêtements de 10 ans. Un surplus chantier de 5 % est considéré pour l'ensemble des matériaux de construction. Un système de chauffage électrique à air est considéré.

En fin de vie du bâtiment, on fait l'hypothèse que 66 % des déchets inertes (béton, céramique, etc.) sont récupérés pour servir en sous-couche routière à la place de granulats naturels. Le reste des déchets inertes est envoyé en décharge (ADEME 2015). Concernant les matériaux type bois, 75 % sont valorisés en fin de vie et 25 % expédiés en décharge. La valorisation considérée est une valorisation énergétique de production de chaleur en remplacement éventuel de gaz naturel. Les autres matériaux combustibles (polystyrène) sont incinérés pour 60 % et envoyé en décharge pour le reste.

4. RESULTATS

4.1. SIMULATION ENERGETIQUE DYNAMIQUE

Les résultats de la simulation énergétique dynamique sont donnés dans le Tableau 3 ci-dessous. Les deux variantes ont des besoins de chauffage très proches, ce qui permet de comparer le choix des systèmes constructifs à performance énergétique équivalente.

	Besoins de chauffage (kWh/an)	Apports Internes (appareils kWh/an)	Apports Internes (métaboliques kWh/an)	Tmax Séjour (°C)	Production PV (kWh/an)
I-BB	1173	3224	1494	30,5	4964
I-OB	1177	3224	1494	30,8	4964

Tableau 4 : Résultats de la simulation énergétique dynamique pour les deux variantes I-BB et I-OB

4.2. ANALYSE DE CONTRIBUTION

L'analyse de contribution s'effectue à partir de la variante de base I-BB (sans production photovoltaïque). Les différentes étapes du cycle de vie sont évaluées en équivalent-habitants année : la valeur absolue de l'indicateur est divisée par une valeur de référence représentant l'ensemble des émissions globales (tous secteurs économiques confondus) sur une année et sur une zone géographique donnée. Les valeurs de normalisation utilisées sont données dans le Tableau 1. Les résultats sont présentés à la Figure 2 ci-dessous.

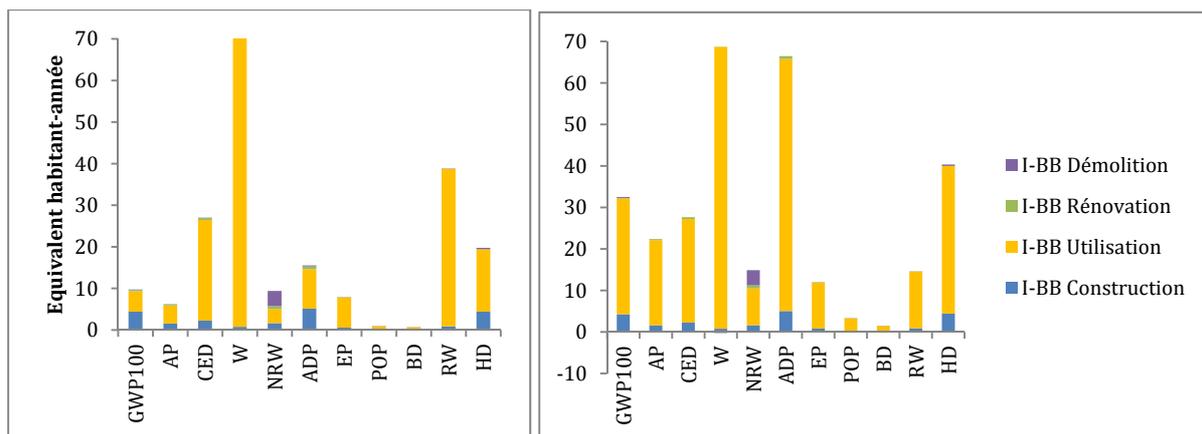


Figure 2 : Analyse de contribution en ACV-A (gauche) et ACV-C (droite) sur la base des impacts de la maison I-BB normalisés

Pour les deux approches, les indicateurs de production d’ozone photochimique (POP) et de dommage à la biodiversité (BD) apparaissent comme non prioritaires et l’eau utilisée (W) et les dommages à la santé (HD) comme prioritaires. L’indicateur d’effet de serre (GWP100) prend une importance beaucoup plus grande dans la méthode ACV-C, les déchets radioactifs (RW) sont très importants en ACV-A et beaucoup moins en ACV-C.

La contribution des différentes étapes du cycle de vie au bilan global varie de façon importante selon la méthode considérée. L’utilisation du bâtiment est largement prépondérante en ACV-C, son poids est plus faible en ACV-A. Les étapes de construction, rénovation et démolition représentent jusqu’à 64 % des déchets produits et 49 % de l’effet de serre en ACV-A contre respectivement 40 % et 14 % en ACV-C.

4.3. CHOIX D’UN PRINCIPE CONSTRUCTIF

Les résultats obtenus pour la maison I-BB et I-OB sont donnés dans le Tableau 5 sur les seules phases de construction, rénovation et démolition. La phase d’utilisation est pratiquement identique (moins de 1 % de différence) en conséquence de la performance énergétique similaire des deux maisons.

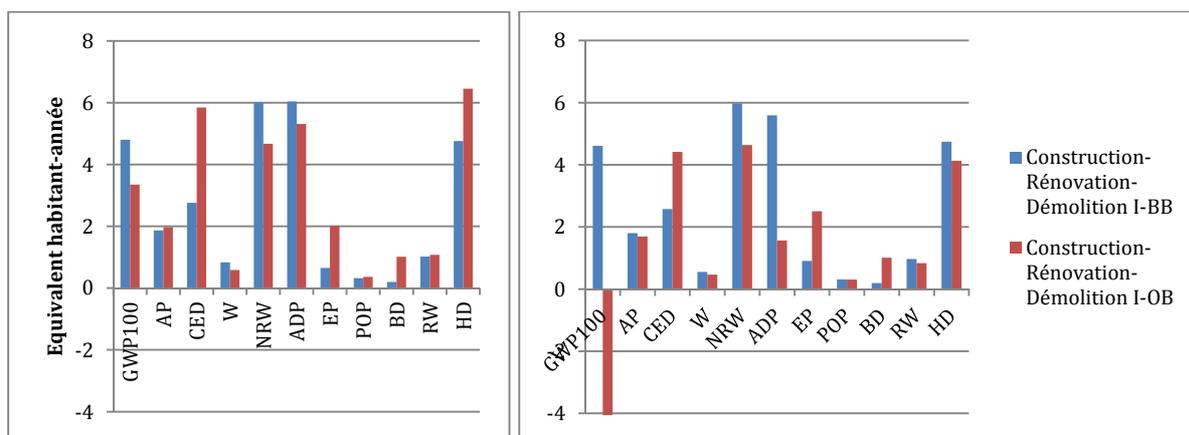


Figure 3: Bilan environnemental des variantes bois et béton exprimé en équivalent habitant-année, en ACV-A (gauche) et ACV-C (droite)

La méthode ACV-C est plus favorable à la variante I-OB que la méthode ACV-A grâce à la comptabilisation des impacts évités par la valorisation énergétique du bois en fin de vie. Les

dommages à la biodiversité sont principalement liés à l'utilisation des sols, la foresterie étant une activité extensive consommant beaucoup d'espace.

4.4. PRODUCTION LOCALE D'ELECTRICITE PHOTOVOLTAÏQUE

L'option de conception évaluée concerne la décision d'installer un système photovoltaïque. On considère les impacts liés à la fabrication et à la rénovation des équipements et les impacts évités par une consommation moindre d'électricité et éventuellement par un export d'électricité vers le réseau. Les résultats selon la méthode utilisée (ACV-A ou ACV-C) sont donnés à la figure 3 ci-dessous.

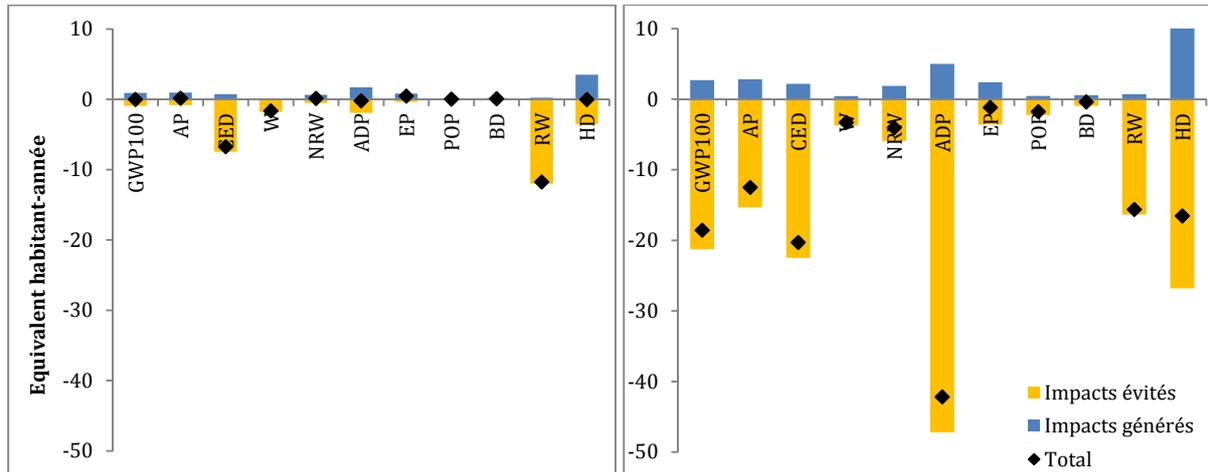


Figure 3 : Impacts générés (>0) ou évités (<0) par l'installation du système photovoltaïque, selon la méthode considérée, ACV-A (gauche) ou ACV-C (droite), exprimé en équivalent habitant-année.

La méthode ACV-C est plus favorable que la méthode ACV-A à la mise en place du système PV et ce pour l'ensemble des indicateurs considérés ; le bilan (losange noir dans la figure 3) est négatif : davantage d'impacts sont évités que générés. En effet, la prise en compte de l'électricité exportée ainsi que les impacts importants de l'électricité consommée (produite par les technologies marginales de production, gaz, charbon et nucléaire) renforcent l'intérêt environnemental de la production renouvelable locale d'énergie.

5. CONCLUSION

Le choix d'une approche attributionnelle ou conséquentielle pour la réalisation de l'étude environnementale d'un projet de bâtiment a une influence importante sur l'aide à la décision apportée. Le classement des meilleures variantes peut être différent selon la méthode utilisée. Le choix doit être fait en fonction des objectifs de l'étude.

L'utilisation de l'ACV en phase amont a pour objectif d'apporter une aide à la décision de façon à réorienter les pratiques de conception vers des pratiques plus respectueuses de l'environnement. Ceci plaide pour l'utilisation d'une approche conséquentielle pour l'aide à la conception. Les répercussions environnementales positives ou négatives d'un projet sont évaluées de façon plus réaliste et exhaustive que dans le cas de l'approche ACV-A qui semble plus adaptée à une approche de certification ou de suivi des évolutions de l'ensemble du parc bâti. L'utilisation de l'ACV conséquentielle permet d'évaluer de façon différenciée des stratégies de conception (bois certifié ou non, « *design for*

dismantling ») et intègre les interactions entre un bâtiment ou un système et les systèmes énergétiques, notamment dans le cas de l'électricité (production marginale d'électricité).

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le cadre de la chaire Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. 2015. "Déchets : Chiffres Clés - Edition 2015."
http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-dechets-201507_8500.pdf.
- Brander, M., R. Tipper, C. Hutchison, and G. Davis. 2008. *Technical Paper: Consequential and Attributional Approaches to LCA: A Guide to Policy Makers with Specific Reference to Greenhouse Gas LCA of Biofuels*. Econometrica Press.
http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0804_Ecometrica_-_Consequential_and_attributional_approaches_to_LCA.pdf.
- Chevalier, Jacques. 2009. "ACV Utilisation Dans Le Secteur de La Construction."
<http://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/encyclopedia/42566210-g5880.pdf>.
- Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives (CEA). 2010. "Projet ANR Habisol 2008, SIMINTEC L1-1, Plateforme INCAS, Description Des Bâtiments Test et Des éléments et Systèmes Contenus." Rapport technique DTS/DR/2010/022. CEA Liten.
- Earles, J., and Anthony Halog. 2011. "Consequential Life Cycle Assessment: A Review." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16 (5): 445–53. doi:10.1007/s11367-011-0275-9.
- Halvgaard, R., N.K. Poulsen, H. Madsen, and J.B. Jorgensen. 2012. "Economic Model Predictive Control for Building Climate Control in a Smart Grid." In *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES*, 1–6. doi:10.1109/ISGT.2012.6175631.
- Pannier, Marie-Lise. 2014. "Analyse de Cycle de Vie Des Maisons Passives de La Plateforme INCAS."
- Peuportier, B., and Blanc Sommereux, I. 1990. "Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings." *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109–20. doi:10.1080/01425919008909714.
- Peuportier, B.L.P. 2001. "Life Cycle Assessment Applied to the Comparative Evaluation of Single Family Houses in the French Context." *Energy and Buildings* 33 (5): 443–50. doi:10.1016/S0378-7788(00)00101-8.
- Peuportier, Stéphane Thiers, and Alain Guiavarch. 2013. "Eco-Design of Buildings Using Thermal Simulation and Life Cycle Assessment." *Journal of Cleaner Production* 39 (0): 73–78. doi:10.1016/j.jclepro.2012.08.041.
- Polster, Bernd, Bruno Peuportier, Isabelle Blanc Sommereux, Pierre Diaz Pedregal, Christophe Gobin, and Eric Durand. 1996. "Evaluation of the Environmental Quality of Buildings towards a More Environmentally Conscious Design." *Solar Energy* 57 (3): 219–30. doi:10.1016/S0038-092X(96)00071-0.
- Rabl, Ari, Anthony Benoist, Dominique Dron, Bruno Peuportier, Joseph V. Spadaro, and Assaad Zoughaib. 2007. "How to Account for CO2 Emissions from Biomass in an LCA." *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (5): 281–281. doi:10.1065/lca2007.06.347.
- Vorger, Eric. 2014. "Étude de L'influence Du Comportement Des Occupants Sur La Performance énergétique Des Bâtiments." Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Zabalza Bribián, Ignacio, Alfonso Aranda Usón, and Sabina Scarpellini. 2009. "Life Cycle Assessment in Buildings: State-of-the-Art and Simplified LCA Methodology as a Complement for Building Certification." *Building and Environment* 44 (12): 2510–20. doi:10.1016/j.buildenv.2009.05.001.