

# L'analyse de cycle de vie appliquée à l'écoconception des bâtiments et des quartiers

Bruno Peuportier<sup>1</sup>, Patrick Schalbart<sup>1</sup>

<sup>1</sup>MINES ParisTech, PSL Research University, CES - Centre d'efficacité énergétique des systèmes

## RESUME

Cet article montre comment l'analyse de cycle de vie (ACV) est appliquée pour conforter une démarche d'écoconception en quantifiant les impacts environnementaux des bâtiments et des quartiers. Les choix méthodologiques, adaptés à cet objectif d'écoconception, sont explicités en montrant les différences avec l'ACV mise en œuvre dans la réglementation, qui répond à d'autres objectifs. Le lien avec la simulation thermique dynamique est important pour tenir compte de l'inertie thermique apportée par certains matériaux, et évaluer à la fois la performance environnementale et la résilience face au changement climatique. La validation des modèles, l'utilisation de méthodes d'analyse de sensibilité, d'optimisation et de calcul d'incertitude sont abordées. Quelques exemples d'application permettent d'illustrer la méthode dans le cas de construction neuve ou de réhabilitation à l'échelle des matériaux, des bâtiments et des quartiers. Par rapport à des démarches en silo, une approche systémique de l'ACV, intégrant à la fois les matériaux et l'énergie, est plus efficace pour répondre aux objectifs de transition écologique.

**Mots-clefs** analyse de cycle de vie, écoconception, bâtiment, quartier

## I. INTRODUCTION

L'objectif de nos travaux est d'aider à concevoir des bâtiments et des quartiers à moindre impact environnemental. Pour répondre à cet objectif, nous développons des modèles basés sur la physique des bâtiments et sur l'évaluation des impacts par l'analyse de cycle de vie (ACV). Plus de 25 ans après la première thèse en France concernant l'application de l'ACV dans le domaine du bâtiment (Polster, 1995), cette méthode a été intégrée à la réglementation qui entrera en vigueur en 2022. Elle permet de vérifier le respect d'une exigence réglementaire concernant les émissions de gaz à effet de serre dans la construction neuve. Cette vérification intervient en fin de projet, mais l'ACV est d'autant plus utile qu'elle est utilisée en phase amont de conception, durant laquelle les décisions prises ont le plus d'influence sur la performance environnementale. La méthode peut d'autre part s'appliquer utilement à des opérations de réhabilitation, et à l'échelle

de projets urbains comme les éco-quartiers. Le présent article aborde ainsi différentes applications de l'ACV dans un objectif d'aide à la conception.

## II. QUELQUES ASPECTS METHODOLOGIQUES

L'écoconception consiste à prendre en compte les aspects environnementaux dans la conception d'un produit, ce qui peut s'appliquer à un bâtiment ou un quartier, y compris pour la conception d'un projet de réhabilitation. En permettant d'évaluer un ensemble d'indicateurs correspondant aux principaux impacts environnementaux, l'ACV constitue un outil approprié à cette démarche. Intégrant l'ensemble des étapes du cycle de vie (fabrication des matériaux, chantier, utilisation, rénovation, fin de vie et recyclage), elle permet d'éviter le déplacement d'impacts dans le temps. Prenant en compte les impacts générés dans le bâtiment lui-même mais aussi en dehors de la parcelle, elle évite également le déplacement d'impacts dans l'espace.

Depuis les premiers développements menés dans les années 1990, les connaissances concernant l'évaluation des impacts ont profondément évolué. La méthode des volumes critiques, que l'on voit encore apparaître dans certaines fiches de la base INIES sur les produits de construction (indicateurs de pollution de l'air et de l'eau), ne prend pas en compte le devenir des polluants dans l'environnement. Des modèles plus élaborés (Fantke et al., 2017) permettent de passer des émissions à des concentrations dans différents compartiments écologiques (air, eau douce, eau de mer, sédiments, sols) en tenant compte des processus de transport (vent, diffusion air/eau, absorption, sédimentation, érosion, déposition, écoulements...), et de (bio)dégradation (photochimie, hydrolyse...). Des transferts (eau potable, nourriture) induisent alors des doses reçues et des effets sur la santé. Les dommages à la santé, mais aussi aux écosystèmes (donc à la biodiversité) sont alors évalués (Bulle, 2019 ; Huijbregts, 2017) mais ceci nécessite des données d'inventaires suffisamment complètes, par exemple issues de la base ecoinvent (Frischknecht, 2004).

La manière d'appliquer l'ACV dépend des objectifs de l'étude. Une réglementation alloue un quota d'émissions à chaque bâtiment. Idéalement, à partir de limites planétaires, le quota mondial d'émissions pourrait être réparti entre les pays puis les secteurs (industrie, transports, construction...) pour déduire les seuils réglementaires. Cela correspond à la démarche de l'ACV attributionnelle. Fixer des objectifs en silo sur les produits et sur l'énergie est contre-productif : un seuil d'impact sur les produits limite la quantité d'isolant et de capteurs solaires, ce qui nuit à la performance globale sur l'ensemble du cycle de vie. Lorsqu'un élément est inclus dans plus d'un secteur, ses impacts sont répartis entre ces secteurs afin d'éviter un double comptage. C'est le cas par exemple de capteurs photovoltaïques qui assurent à la fois le rôle de toiture et de production d'électricité. Dans le calcul réglementaire, les impacts sont répartis entre le bâtiment et le système électrique. La quantité d'électricité exportée vers le réseau électrique n'est pas prise en compte dans le bilan du bâtiment, ce qui est défavorable à la transition énergétique.

Dans un objectif d'aide à la conception, la question n'est pas de répartir les impacts entre les acteurs ou les secteurs, mais de savoir si intégrer des capteurs photovoltaïques en toiture augmente ou réduit les impacts globalement. Dans ce cas, le calcul va intégrer les conséquences des choix de conception sur ce qui est appelé le « système d'arrière-plan » avec lequel le système

étudié (le bâtiment ou le quartier) interagit, et qui inclut en particulier le système électrique. Cela correspond à la démarche de l'ACV conséquentielle. Dans ce cas, le calcul tient compte d'une réduction des impacts liée au fait que l'export d'électricité vers le réseau évite une production qui aurait été nécessaire sans cet export.

Identifier cette production n'est pas si simple. La loi du marché va faire en sorte que la production évitée corresponde au moyen le plus onéreux utilisé au moment où l'électricité est exportée. Il faut alors modéliser le système électrique heure par heure pour déterminer ce moyen de production et les impacts environnementaux correspondants (Roux, 2016 a). Il faut également intégrer l'évolution du système électrique sur le long terme, ce qui amène à considérer des scénarios prospectifs (Roux, 2016 b). Cette prise en compte des variations temporelles dans la modélisation correspond à la notion d'ACV dynamique : ce type de modèle représente de manière physique les phénomènes liés aux variations d'usages, de productions et de stockage d'énergie et permet de valoriser par exemple des stratégies de flexibilité de la demande.

La méthode d'ACV « dynamique simplifiée » mise en œuvre dans le calcul règlementaire ne prend pas en compte ces aspects dynamiques, mais consiste à considérer qu'une émission de gaz à effet de serre dans le futur a moins d'importance qu'une émission actuelle. Des avis circonstanciés ont été émis, selon lesquels cette méthode crée une dette envers les générations futures. Les autorités françaises ont répondu<sup>1</sup> : « Entre deux émissions qui auraient lieu aujourd'hui ou dans 25 ans, la première réchauffera la terre pendant 100 ans alors que la seconde ne la réchauffera que pendant 75 ans » ce qui est infondé. L'objectif affiché est de valoriser le stockage de carbone dans les matériaux biosourcés comme le bois, or il existe d'autres méthodes pour satisfaire cet objectif (Peuportier, 2021). En réduisant la prise en compte des émissions futures, l'ACV « dynamique simplifiée » constitue un frein à la transition écologique, qui nécessite un investissement carbone à la fabrication des technologies pour réduire ensuite les émissions dans la durée. Face à l'urgence climatique, il serait plus judicieux d'isoler les bâtiments existants plutôt que limiter l'isolation des constructions neuves.

L'usage de l'ACV comme aide à la conception peut d'autre part conduire à considérer des scénarios d'usage des bâtiments spécifiques au contexte d'un projet (Vorger, 2014). Par exemple des logements ne seront sans doute pas chauffés à 16°C pendant la journée, comme le suppose le calcul règlementaire. Les premières applications des années 1990 avaient montré que les comportements influencent autant les performances environnementales que la conception, suggérant de fournir un mode d'emploi pour les bâtiments éco-conçus. Des hypothèses comme la durée de vie des bâtiments (50 ans dans le calcul règlementaire) peuvent aussi être adaptées ou donner lieu à une étude de sensibilité : considérer une durée de vie plus longue est préférable à l'obsolescence programmée.

La plupart des matériaux de construction influencent la performance énergétique des bâtiments en termes d'isolation et d'inertie thermique (chauffage et rafraîchissement), de propriétés radiatives (éclairage), de production d'électricité et/ou de chaleur renouvelable, etc. Il est alors essentiel, si le concepteur souhaite comparer différentes solutions techniques, de relier l'ACV à la simulation énergétique.

---

<sup>1</sup> Réponses aux avis circonstanciés et aux observations consécutifs aux notifications des décret et arrêtés « relatifs aux exigences et méthodes » UE 790/2020-791/2020 - 792/2020

La validation des modèles est essentielle dans une démarche scientifique. Les outils de simulation thermique peuvent être comparés à des mesures (Munaretto, 2017).

L'ACV est un outil d'évaluation, qu'il convient de compléter pour une utilisation en aide à la conception. Il est tout d'abord utile d'établir des références, permettant à un concepteur de mieux cerner les performances de son projet : sont-elles proches des meilleures pratiques, ou au contraire faut-il continuer à rechercher des améliorations ? Un échantillon de plus de 20 000 simulations (logements, bureaux, bâtiments d'enseignement et de santé, neuf ou ancien, avec différents matériaux de structures et énergies de chauffage) a permis d'établir un intervalle de variation pour chacun des indicateurs environnementaux considérés (Wurtz, 2021).

La Fig. 1 montre l'exemple des bureaux d'IZUBA Energies situés près de Montpellier. Ce bâtiment en structure bois, isolé par de la paille, dont l'inertie thermique est améliorée par des briques de terre crue et des enduits en terre, chauffé et rafraîchi par un système thermodynamique et comportant des capteurs solaires thermiques et photovoltaïques, atteint des performances environnementales proches des meilleures pratiques. Il faut noter que les valeurs minimales des indicateurs d'impacts ne correspondent pas toutes au même bâtiment de l'échantillon. Il est alors très difficile d'atteindre ces valeurs minimales pour tous les indicateurs sur un même projet.



Bureaux d'IZUBA à Fabrègues, Architecte : Vincent Rigassi (photo Steven Morlier)

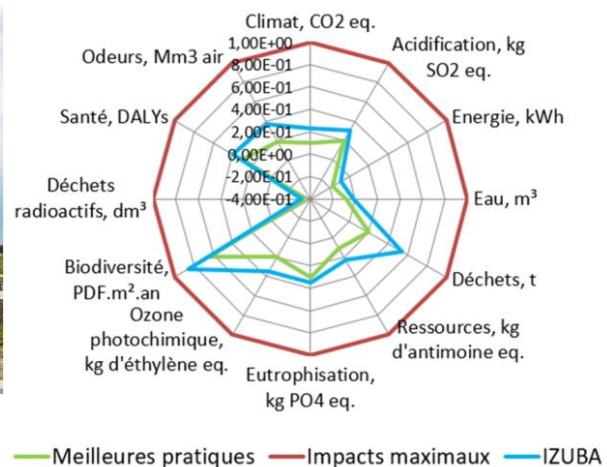


FIGURE 1. Exemple d'évaluation d'un projet par ACV

Si un projet doit être amélioré, une analyse de sensibilité (Pannier, 2018) permet d'identifier les paramètres les plus influents ce qui aide à établir des priorités parmi les leviers d'action et facilite le calcul d'incertitudes. Une optimisation peut être menée à l'aide l'algorithmes génétiques (Recht, 2016).

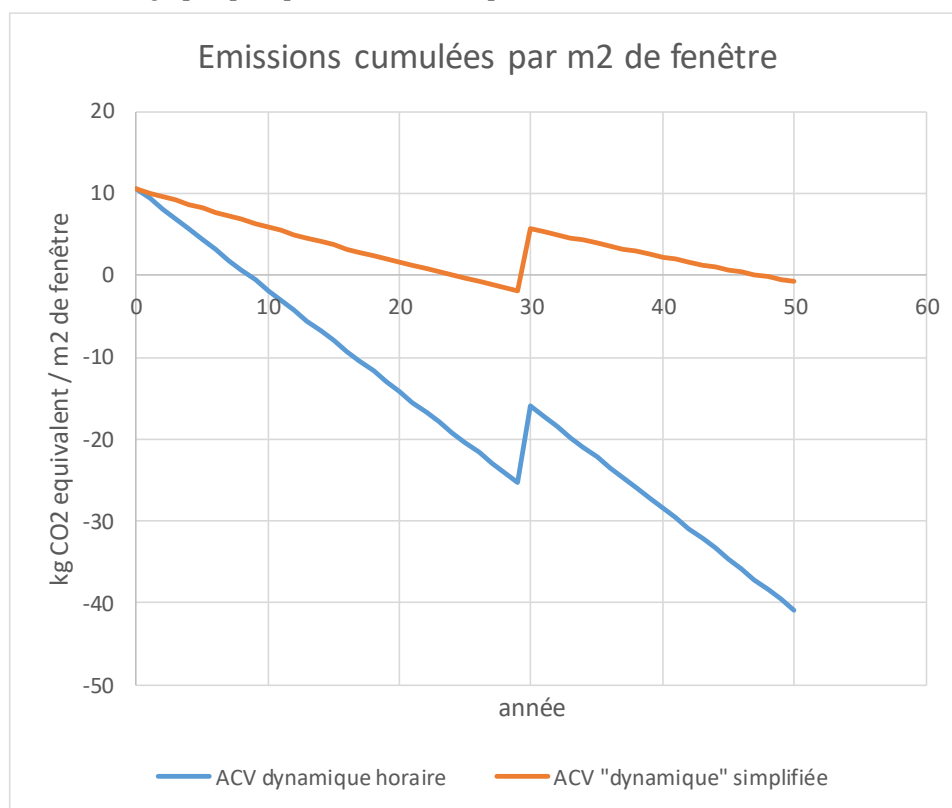
## II. EXEMPLES D'APPLICATIONS

La première application en France a concerné une maison prototype réalisée dans le cadre de l'exposition Ecologis à La Villette en 1996. D'après ces premiers calculs, le concept exposé permettait une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à une

maison standard définie lors d'un atelier organisé par le ministère en charge du logement, à partir de statistiques de l'INSEE sur les matériaux de construction les plus couramment employés. Le modèle a depuis été enrichi, diffusé sous la forme d'un logiciel d'aide à la conception par l'éditeur IZUBA Energies, et appliqué à de nombreux projets pilotes.

C'est le cas par exemple des premières maisons passives construites en France, en 2007 à Formerie (60) par l'entreprise Les Airelles Construction. Equipées d'un chauffage par pompe à chaleur, ces maisons réduisent d'un facteur 4 les émissions de GES sur leur cycle de vie par rapport à une maison standard de l'époque (règlementation thermique de 2005) même si les impacts de l'étape de fabrication/construction sont un peu plus élevés (Thiers, 2012).

Le calcul réglementaire de la RE2020 leur serait très défavorable, en particulier du fait de la méthode d'ACV « dynamique » qui pénalise les investissements énergétiquement performants. La Fig. 2 montre la différence au cours du temps entre un triple et un double vitrage sur les émissions de GES cumulées par m<sup>2</sup> de fenêtre. La valeur pour l'année 0 correspond à la quantité supplémentaire de GES émis pour la fabrication d'un m<sup>2</sup> de triple vitrage, par rapport à du double vitrage. Les économies d'énergie font ensuite baisser les émissions jusqu'au moment où la fenêtre doit être remplacée, une durée de vie de 30 ans étant considérée. Ces économies sont évaluées en considérant une fenêtre en façade nord d'une maison individuelle type en Ile de France et un chauffage par pompe à chaleur (Peuportier, 2021).



**FIGURE 2.** Différence d'émissions de GES cumulées entre un triple et un double vitrage

D'après le calcul « dynamique » simplifié, le triple vitrage n'a pas d'intérêt puisqu'il conduit globalement à des émissions plus élevées sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. L'outil d'aide à la conception basé sur la physique (ACV dynamique horaire) montre au contraire que le triple vitrage est « rentabilisé » en moins de 10 ans, et que la réduction d'émissions sur le cycle de vie est environ 4 fois la quantité émise initialement.

La construction neuve ne représente chaque année qu'environ 1% du parc de bâtiments, il est donc essentiel d'appliquer aussi l'ACV à la rénovation. Une première étude a été menée dans le cadre du projet européen REGEN LINK sur un immeuble HLM à Montreuil (Peuportier, 2002). Augmenter l'épaisseur d'isolant réduit la consommation de chauffage et les émissions de GES correspondantes, mais augmente les émissions à l'étape de fabrication. Cette étude a alors permis de déterminer une épaisseur optimale d'isolant (Fig. 3), l'optimum étant très plat (le total des émissions varie très peu entre 10 et 40 cm d'isolation). Une étude plus récente a montré l'intérêt de la rénovation par rapport à la démolition suivie d'une reconstruction (Palacios-Munoz, 2019).

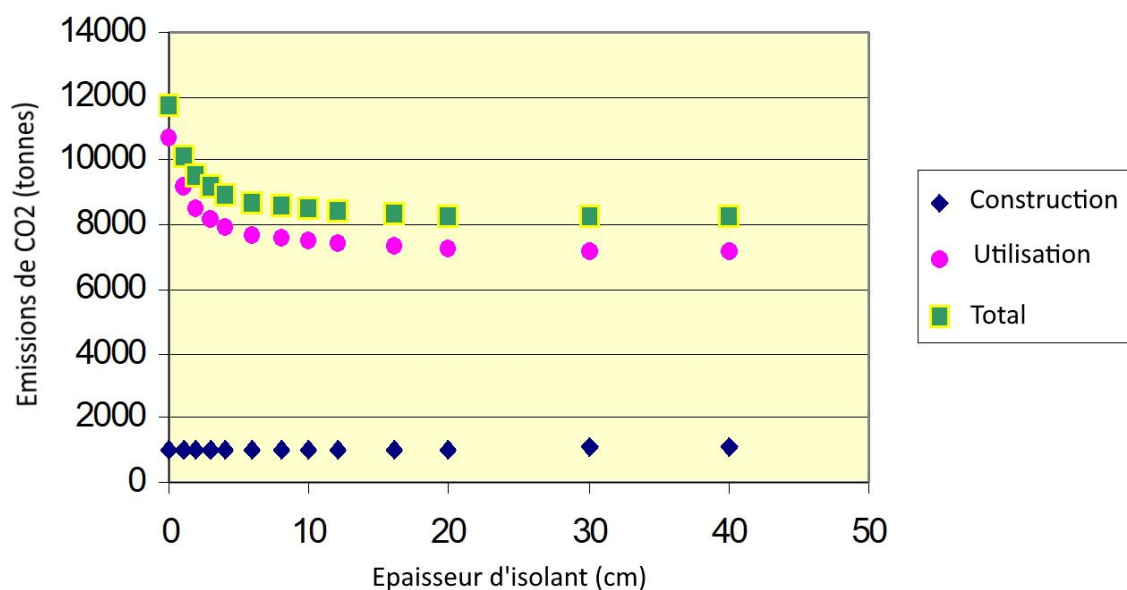
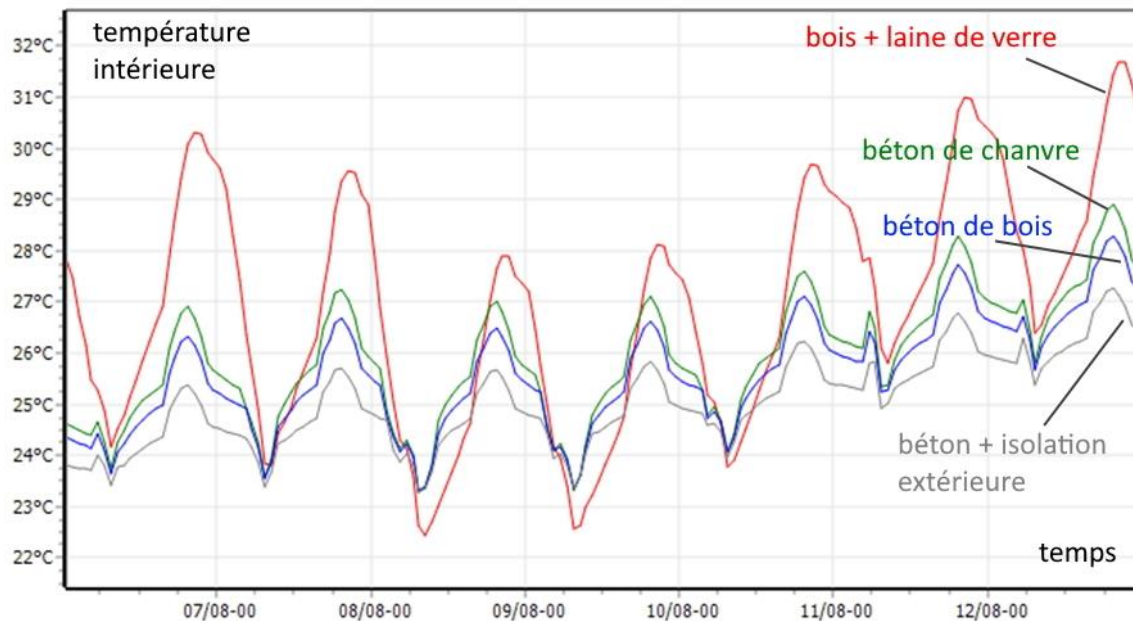


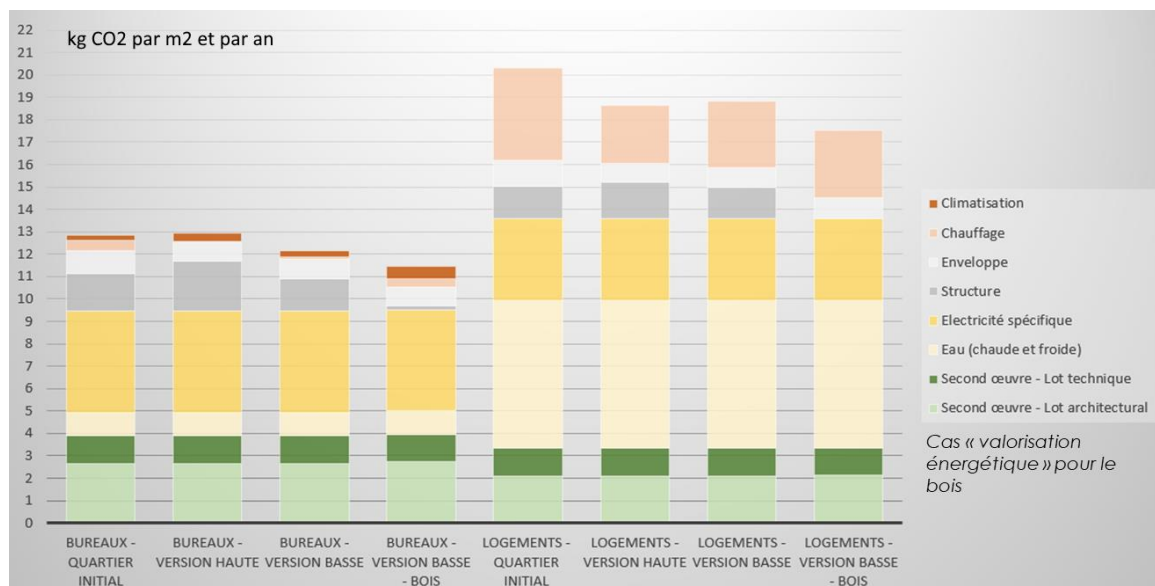
FIGURE 3. Exemple d'application de l'ACV en réhabilitation

Il convient d'associer la réduction des impacts environnementaux à la résilience des bâtiments face au changement climatique. Dans le cadre du projet Résilience soutenu par l'ADEME, un partenariat avec Météo-France permet d'évaluer les niveaux et les durées des surchauffes à l'horizon 2050 et 2100 sur un échantillon de bâtiments depuis les immeubles haussmanniens jusqu'aux maisons à énergie positive. Pour pouvoir se passer de climatisation, il faut à la fois isoler les bâtiments, les ventiler la nuit en été, utiliser des protections solaires et des brasseurs d'air. La faible inertie thermique de bâtiments tout en bois amplifie les variations de température. Il convient alors de compléter les matériaux biosourcés avec des matériaux inertes comme la terre crue ou le béton. L'isolation devrait préférentiellement être placée à l'extérieur et la couche inerte à l'intérieur. Mélanger isolation et inertie (béton de bois ou de chanvre, pisé...) est moins efficace, comme le montre la Fig. 4.



**FIGURE 4.** Profil de température obtenu par simulation dans le cas d'une maison passive (données climatiques correspondant à la canicule de 2003 en Ile-de-France)

Appliquer l'ACV en amont de projets urbains permet d'intégrer des leviers d'action supplémentaires, en termes d'orientation et de compacité des formes urbaines. Un projet très dense comportant des logements et des bureaux, prévu près d'une future gare du Grand Paris Express, a ainsi été étudié. Des bâtiments en structure bois ou béton ont été comparés pour deux morphologies : une variante grande hauteur comportant deux tours de bureaux R+37 et trois tours de logement R+21, et une variante plus basse comportant 5 bâtiments de bureaux R+14 et 6 bâtiments de logements R+10 (Mendes, 2021). En phase amont de conception, il n'a pas été possible de mener des calculs de structure détaillés : la quantification des matériaux s'est basée entre autre sur des données de matériaux de structure par unité de surface collectées pour 200 bâtiments auprès des entreprises au MIT (De Wolf, 2014). L'emprise au sol et les besoins de chauffage sont plus faibles pour la variante à grande hauteur, mais les impacts liés à la structure sont plus élevés comme le montre la Fig. 5. D'autres aspects pourraient être étudiés comme la prise en compte des ascenseurs, d'une production photovoltaïque ou de cultures en toiture selon les surfaces disponibles.



**FIGURE 5.** Exemple d'application de l'ACV en phase amont de conception (Mendes, 2021)

Un autre projet en cours soutenu par l'ADEME, RECA, concerne l'ACV d'un système de production photovoltaïque mis en œuvre sur le quartier Atlantech à La Rochelle. Le bénéfice environnemental lié à la production d'électricité renouvelable sur les 30 ans de durée de vie du système est environ deux fois plus élevé que les émissions liées à la fabrication des composants (modules photovoltaïques, onduleurs...) pour des modules fabriqués en France, et il reste supérieur aux émissions en fabrication même pour des produits provenant de Chine.

### III. CONCLUSIONS ET PRESPECTIVES

L'ACV sera bientôt systématiquement utilisée dans les projets de construction. Le calcul réglementaire fixe la performance minimale à atteindre. Les outils d'aide à la conception sont utiles pour viser une performance plus élevée, et étayer les choix sur des bases plus physiques. Optimiser en silo la performance sur les produits et l'énergie ne permet pas d'atteindre un optimum global sur l'ensemble du cycle de vie : il convient de prendre en compte les interactions entre les composants vitrés, permettant de capter le rayonnement solaire, les éléments inertes permettant de stocker cette chaleur et les équipements qui peuvent permettre une réduction de la consommation d'énergie et des impacts, en fonction de leur inertie et de leur régulation. Les recherches en cours ont par exemple pour objectif de chaîner l'ACV à l'évaluation de la qualité de l'air intérieur afin d'évaluer les impacts sur la santé de manière plus globale, et à des outils de conception paramétrique de manière à s'intégrer davantage au processus de conception architecturale et urbaine.

### Remerciements



Ces travaux ont bénéficié du soutien du Plan Construction et Architecture, de l'ADEME, de l'ANR, de la Commission Européenne, et de la chaire de mécénat *lab recherche environnement VINCI ParisTech*.

## REFERENCES

Bulle, C., Margni, M., Patouillard, L., Boulay, A.-M., Bourgault, G., De Bruille, V., Cao, V., Hauschild, M., Hendeson, A., Humbert, S., Kashef-Haghighi, S., Kounina, A., Laurent, A., Lévassieur, A., Liard, G., Rosenbaum, R. K., Roy, P.-O., Shaked, S., Fantke, P. et Jolliet, O., (2019). IMPACT World+: a globally regionalized life cycle impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment* 24, 1653–1674 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>

De Wolf, C., 2014. Material quantities in building structures and their environmental impact. Master of Science in Building Technology. Massachusetts Institute of Technology, 92 p

Fantke, P., Buster, M., Hauschild, M. Z., Huijbregts, M., Jolliet, O., Kounina, A., Magaud, V., Margni, M., Mckone, T. E., Rosenbaum, R. K., Van De Meent, D. et Van Zelm, R., (2017). USEtox® 2.0 Documentation (Version 1.00). In : [en ligne]. 2017. [Consulté le 2 décembre 2020]. DOI 10.11581/DTU:00000011. Disponible sur : <http://www.usetox.org/model/documentation>

Frischknecht, R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M. 2004. Overview and Methodology, ecoin-vent report No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zup, M., Hollander, A. et Zelm, R. van, (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment* 22, 138 147 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

Mendes, B., 2021. Influence de la forme et du choix de matériaux de structure sur la performance environnementale des quartiers en phase amont, mémoire de projet de fin d'études ENPC.

Munaretto, F., Recht, T., Schalbart, P. and Peuportier, B., 2017. Empirical validation of different internal superficial heat transfer models on a full-scale passive house. *Journal of Building Performance Simulation*, doi: 10.1080/19401493.2017.1331376.

Palacios-Munoz B., Peuportier B., Gracia-Villa L., López-Mesad B., 2019. The importance of estimating lifespan in LCA of buildings: The case of refurbishment vs. new construction, *Building and Environment*, vol 160, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106203>

Pannier, M.-L., Schalbart, P., Peuportier, B., 2018. Comprehensive assessment of sensitivity analysis methods for the identification of influential factors in building LCA, *J. Cleaner Production*, Volume 199, 20 October 2018, Pages 466-480, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.070>

Peuportier, B., 2021. L'ACV dynamique décryptée par les chercheurs, <https://www.lab-recherche-environnement.org/fr/article/lanalyse-de-cycle-de-vie-dynamique-decryptee-par-les-chercheurs/>

Peuportier, B., 2002. Assessment and design of a renovation project using life cycle analysis and Green Building Tool, Sustainable Building 2002 Conference, Oslo

Polster B., Contribution à l'étude de l'impact environnemental des bâtiments par analyse de cycle de vie, thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, décembre 1995

Recht T., Schalbart P., and Peuportier B., 2016. Ecodesign of a "plus energy" house using stochastic occupancy model, life cycle assessment and multi-objective optimisation, Hamza N and Underwood C. (Ed), Building Simulation & Optimization 2016, Newcastle

Roux C., Schalbart P. and Peuportier B., (2016 a). Accounting for temporal variation of electricity production and consumption in the LCA of an energy-efficient house, Journal of Cleaner Production 113 532-540

Roux C., Schalbart P., Assoumou E. and Peuportier B., (2016 b). Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts, Applied Energy 184, pp. 619-629

Thiers S. and Peuportier B., (2012). Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings, Building and Environment, Volume 51, pp. 276-284

Vorger E., Schalbart P., Peuportier B., 2014. Integration of a Comprehensive Stochastic Model of Occupancy in Building Simulation to Study how Inhabitants Influence Energy Performance, 30th International PLEA Conference, Ahmedabad

Wurtz A., Peuportier B., Application of the life cycle assessment to a building sample for in order to helping in projects evaluation, Climamed Conference, May 2021, Lisbonne (online), Portugal