



HAL
open science

Couplage entre conception paramétrique et analyse de cycle de vie pour l'écoconception des quartiers

Bruno Peuportier, Aurore Wurtz, Patrick Schalbart

► **To cite this version:**

Bruno Peuportier, Aurore Wurtz, Patrick Schalbart. Couplage entre conception paramétrique et analyse de cycle de vie pour l'écoconception des quartiers. Conférence Francophone de l'International Building Performance (IBPSA) France 2022, May 2022, Châlons en Champagne, France. hal-03801054

HAL Id: hal-03801054

<https://hal.science/hal-03801054v1>

Submitted on 6 Oct 2022

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.

Couplage entre conception paramétrique et analyse de cycle de vie pour l'écoconception des quartiers

Aurore Wurtz*¹, Patrick Schalbart¹, Bruno Peuportier¹

¹ Mines ParisTech, Université de Recherche PSL
CES – Centre d'efficacité énergétique des systèmes,
60 Bd St Michel 75006 Paris, France
*aurore.wurtz@mines-paristech.fr

RESUME.

La conception de quartiers à haute performance environnementale nécessite des outils d'aide à la décision permettant une prise en compte globale des éléments liés au bâti dès la phase amont des projets, afin de guider les acteurs des projets urbains sur les choix décisifs. L'aménagement du quartier, la forme, la hauteur et l'emplacement des bâtiments ont une influence sur les aspects thermiques et environnementaux des projets. La conception paramétrique complétée d'une analyse de cycle de vie (ACV) est un moyen de comparer les impacts environnementaux de différentes variantes de bâtiments et ainsi d'optimiser leur forme lorsque cela est encore possible, dès l'esquisse du projet. Cette communication présente le développement d'un couplage entre un logiciel de conception paramétrique Rhino - Grasshopper et l'outil de simulation thermique dynamique et d'ACV Pleiades, afin de proposer des projets urbains à faibles impacts environnementaux. La compacité des bâtiments, les masques solaires et les matériaux liés à la structure sont des paramètres pris en compte dans ce couplage. Une application à un cas d'étude a permis de comparer les impacts environnementaux d'une tour de bureaux et de trois bâtiments de 10 étages, pour une même surface utile.

MOTS-CLÉS : Conception paramétrique, Analyse de cycle de vie (ACV), Quartiers, Structure

ABSTRACT.

The design of low environmental impact neighbourhoods requires decision aid tools which take in consideration all building-related elements from the very beginning of urban projects, in order to guide stakeholders in taking crucial decisions. Neighbourhood characteristics such as the shape, height and location of buildings influence thermal and environmental aspects of the projects. Parametric design completed with life cycle assessment (LCA) is a way to compare environmental impacts of different building variants, and thus optimise the shape at the earliest stage, when some change is still possible. This paper presents the development of a coupling between the parametric design software Rhino – Grasshopper and the dynamic thermal simulation and LCA tool Pleiades, in order to propose urban projects with low environmental impacts. The compactness of buildings, shading effects and materials related to the structure are parameters taken into account. In a case study, the environmental impacts of an office tower and three 10-storey buildings, for a fixed floor area, were compared.

KEYWORDS: Parametric design, Life cycle assessment (LCA), Neighbourhood, Structure

1. INTRODUCTION

Les décisions prises lors des projets de conception de bâtiments et d'aménagement urbain impactent notre génération mais également les générations futures. Les bâtiments ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années, des impacts associés à leur utilisation, rénovation et fin de vie seront observés durant le siècle suivant leur construction, selon leur durée de vie. Il est important d'orienter

la prise de décision afin qu'elle soit la plus cohérente possible pour répondre aux enjeux actuels et futurs, qui s'orientent autant autour de la fonctionnalité des bâtiments que de leurs impacts environnementaux. La méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) permet d'évaluer les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie dans une approche multicritère ; cependant elle nécessite de nombreux détails ce qui implique qu'elle est encore trop souvent appliquée tardivement, lorsqu'un changement de structure ou de géométrie du bâtiment est trop coûteux. Les degrés de liberté sont alors très faibles.

L'évaluation environnementale des bâtiments doit donc être effectuée en phase amont, lorsque le concept architectural est développé ; ce dernier comprend la définition du nombre d'étages, de l'orientation du bâtiment ainsi que de sa géométrie et sa structure (Hollberg et Ruth 2016; Lotteau et al. 2015). Il est alors possible d'étudier l'influence de la géométrie et de la structure du bâtiment sur son impact environnemental et de proposer des choix de conception en conséquence. Nous proposons de développer un outil destiné aux architectes et aux aménageurs, qui leur permettra d'orienter leurs décisions afin qu'elles répondent aux enjeux économiques et environnementaux d'un tel projet. Cette communication présente le couplage entre le logiciel de modélisation Rhinoceros 3D ainsi que son outil de conception paramétrique Grasshopper, avec le logiciel Pleiades dédié à la simulation thermique et à l'écoconception des bâtiments. Ce développement a pour but de faciliter l'accès aux résultats environnementaux dès la phase amont des projets de conception de bâtiments afin de guider les acteurs des projets vers des solutions à moindre impact. Les matériaux liés à la structure du bâtiment sont adaptés selon les caractéristiques de conception et leur impact est évalué.

Les spécificités du couplage et du calcul des éléments de structure sont présentées dans le paragraphe « Méthodologie ». La méthode est ensuite appliquée à deux variantes de bâtiments de surface utile identique, décrites dans la section « cas d'étude ». Finalement, la section « résultats » présente les résultats thermiques et environnementaux des variantes, ainsi que l'influence de la structure. Cette communication présente la faisabilité du couplage à travers une application à deux variantes de bâtiments, et montre l'utilité d'une future automatisation de la démarche pour proposer une aide à la décision par le biais de variations paramétriques. La méthode pourra alors être généralisée à l'ensemble des bâtiments d'un quartier afin de guider les décisions relatives aux plans d'aménagement urbains.

2. METHODOLOGIE

L'approche choisie pour développer cet outil d'aide à la décision se base sur la méthodologie BIM (*Building Information Modelling*), qui vise à faciliter la communication et la gestion de données entre les différents acteurs d'un projet de conception. L'ensemble du cycle de vie du bâtiment est pris en compte, depuis les esquisses jusqu'à la gestion de la fin de vie des éléments. Il s'agit ainsi de permettre la modélisation des données du bâtiment à l'aide d'une maquette numérique partagée pour simplifier les processus de conception, de construction et d'exploitation, afin de guider les prises de décisions.

L'évaluation environnementale des bâtiments est effectuée par la méthode de l'analyse de cycle de vie qui évalue les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à la fabrication des matériaux, jusqu'à la fin de vie du bâtiment. Enfin, un travail de quantification des éléments liés à la structure du bâti a été mené et les

résultats sont utilisés dans cette étude afin d'intégrer l'influence de la structure d'un bâtiment sur son impact environnemental.

2.1. OUTILS DE MODELISATION ET DE SIMULATION

Le logiciel de conception assistée par ordinateur Rhinoceros 3D permet de modéliser des bâtiments quelle que soit leur forme ou leur taille, et est largement utilisé par les architectes. L'application logicielle d'algorithmique graphique Grasshopper s'exécute avec Rhinoceros 3D et intègre des outils supplémentaires utiles dans le cadre d'une comparaison de variantes automatisée ou d'une optimisation, notamment pour la conception paramétrique de bâtiments (Basic et al. 2019; Wiberg et al. 2019).

Le modèle physique COMFIE (Peuportier et Sommereux 1990) de la suite Pleiades est utilisé pour la simulation thermique des bâtiments. Les résultats sont ensuite transmis au moteur de calcul EQUER, qui réalise l'ACV des bâtiments et évalue différents indicateurs environnementaux. Le calcul s'appuie sur la base de données environnementale internationale ecoinvent (version 3.4).

2.2. COUPLAGE DES OUTILS

La suite logicielle **Rhino Grasshopper** permet de modéliser un bâtiment par le dessin (Rhino) ou à travers des algorithmes graphiques (Grasshopper). La programmation visuelle proposée par Grasshopper consiste à connecter les composants les uns aux autres suivant un schéma constructif unique, adapté au projet. La conception paramétrique est ainsi facilitée : il suffit de modifier certains paramètres de base de la conception du bâtiment tels que sa largeur, son nombre d'étages ou sa hauteur sous plafond. Deux *plug-in* de Grasshopper sont également utilisés dans ce couplage : **Ladybug** et **Honeybee**. Ladybug, qui réalise l'analyse des données climatiques, est utilisé pour importer les fichiers météorologiques associés aux projets, dans le format *.epw*. Honeybee quant à lui exécute des simulations d'éclairage naturel (Radiance) et des modèles énergétiques à l'aide d'OpenStudio. C'est cette deuxième fonctionnalité qui contient des composants adaptés à la création d'un modèle de bâtiment, comprenant notamment la définition de l'usage du bâtiment afin de mettre en place des zones thermiques et des fenêtres selon un ratio ou des dimensions préalablement définies. Enfin, Honeybee comprend un composant destiné à exporter le modèle de bâtiment au format **gbXML** (Green Building XML).

Le concept de variation paramétrique apparaît à ce stade du procédé car on crée facilement plusieurs bâtiments de paramètres différents à partir d'une seule modélisation dans le but de les comparer par la suite. L'utilisation de Rhino Grasshopper dans ce cadre comporte un double avantage. Dans le cas de bâtiments de forme régulière, la modélisation est entièrement faisable avec les algorithmes graphiques de Grasshopper, tout en ayant un visuel sur Rhino. Dans le cas de bâtiments non standards, la modélisation à partir de l'outil graphique Rhino reste fonctionnelle. Le dessin doit cependant être très rigoureux afin d'être ensuite exporté en gbXML. On choisira dans cette communication de montrer la faisabilité du couplage avec la méthode simplifiée de modélisation par l'outil Grasshopper.

Le format gbXML est utilisé pour faciliter le transfert des propriétés d'un bâtiment stockées dans un modèle 3D BIM vers les applications de calcul énergétique. Grasshopper permet ainsi de coupler Rhino (utilisé par les architectes) et Pleiades (calculant les consommations énergétiques et l'impact

environnemental des bâtiments). L'outil BIM de la suite Pleiades est utilisé comme intermédiaire afin d'importer le fichier gbXML. La définition de l'enveloppe du bâtiment et du type de fenêtres peut s'effectuer à ce stage du couplage. Le fichier est ensuite converti dans un format adapté à l'éditeur de Pleiades, ce qui permettra d'effectuer une simulation thermique dynamique. Enfin, les résultats de la simulation thermique et les quantités de matériaux déduites de la maquette numérique servent de base à l'ACV.

2.3. INFLUENCE DE LA STRUCTURE

La conception paramétrique est mise en place dans cette étude afin de comparer les impacts environnementaux de différentes variantes de bâtiments. Étant donné que l'on fait varier la taille et la hauteur des bâtiments, il est nécessaire d'adapter les éléments structurels tels que la superstructure, l'infrastructure et les fondations. La superstructure est la partie hors sol du bâtiment, l'infrastructure la partie souterraine et les fondations le socle en contact avec le sol par lequel la structure lui transmet les efforts qui s'exercent sur elle. Pour cela, une étude a permis de collecter les quantités de béton, d'acier et de bois le cas échéant présents dans les fondations et dans la superstructure de bâtiments existants. À partir de ces données, la quantité des matériaux a été approximée en fonction du type de structure (béton ou bois) et du nombre d'étages des bâtiments (Mendes 2022). La quantification précise des matériaux de la structure nécessite de nombreux détails et analyses concernant le bâtiment et le terrain, ainsi que des calculs poussés effectués lors de la conception détaillée. La présente étude concernant la phase amont de conception, il a été choisi de se baser sur des données de cas réels afin d'établir un pré-dimensionnement de la structure pour obtenir un ordre de grandeur des matériaux nécessaires et donc des impacts liés à la structure dans un objectif d'aide à la décision.

3. CAS D'ETUDE

Deux variantes de bâtiments de bureaux situés en région parisienne ont été sélectionnées afin d'illustrer la démarche ; une tour de 30 étages et trois bâtiments de 10 étages, avec une surface utile totale identique. Les performances thermiques ainsi que les impacts environnementaux sont évalués, en prenant en compte les impacts liés à la structure afin de comparer les deux variantes dans leur globalité. La démarche est appliquée en phase amont de conception, les systèmes de chauffage et de ventilation ne sont pas encore définis ; les résultats thermiques seront exprimés en besoins. Le cas d'étude ne contient pas de parking en sous-sol, on ne prendra en compte que les fondations et la superstructure.

3.1. CARACTERISTIQUES DE CONCEPTION

Le bâtiment a été modélisé à partir des algorithmes visuels de Grasshopper afin de faciliter l'export par l'outil BIM. Les caractéristiques de conception sont identiques pour les deux variantes, seul le nombre d'étages diffère. Ces dernières sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques de conception des variantes de bâtiments

	Nombre d'étages	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur sous dalle (m)	Ratio surfaces vitrées	Surface totale (m ²)
Tour de bureaux	30	40	20	3	0,4	24000
Trois bâtiments	10					

de 10 étages						
--------------	--	--	--	--	--	--

Ce cas d'étude a volontairement été défini comme générique afin de montrer la faisabilité du couplage. Le pré-dimensionnement de la structure indique que la tour de 30 étages nécessite entre 18 et 42 % de plus de matériaux que les 3 bâtiments de 10 étages assemblés. En effet, plus le nombre d'étages augmente, plus la quantité de béton et d'acier (dans le cas des structures béton) par m² de surface utile augmente. Les proportions sont présentées figure 1, mettant en relation les quantités de matériaux nécessaires pour la tour de 30 étages et pour la conception des trois bâtiments de 10 étages, regroupés dans l'histogramme suivant. Du béton armé est utilisé dans la superstructure et dans les fondations ; les quantités de béton et d'acier d'armature sont donc réparties entre ces deux éléments structurels.

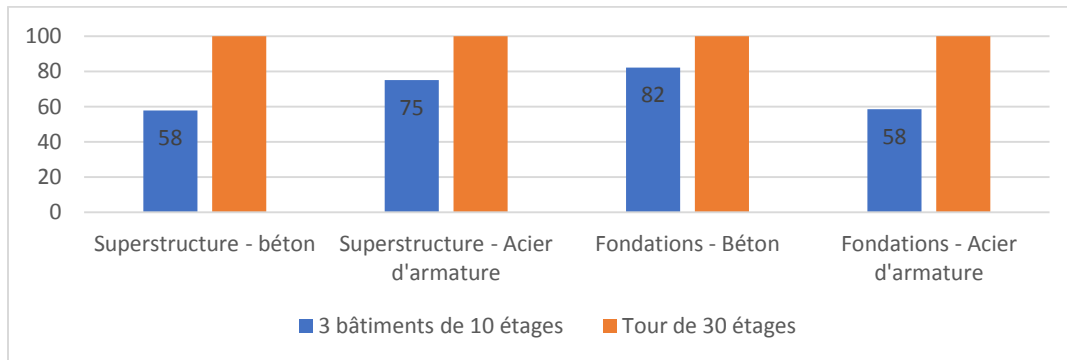


Figure 1 : Quantités relatives de béton et d'acier des éléments structurels (d'après Mendes, 2022)

3.2. MODELISATION ET EXPORT

La visualisation 3D est disponible sur Rhino lors de la création des bâtiments avec Grasshopper. Le modèle de bâtiment est transcrit en format gbXML, puis importé par Pleiades BIM. La représentation 3D y est également disponible. Ces deux illustrations sont présentées figures 2 et 3.

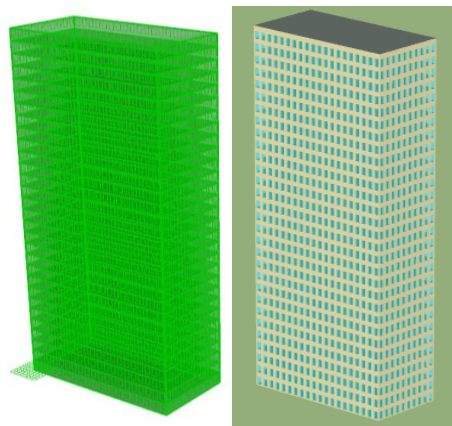


Figure 2: Représentation 3D de la tour de bureaux depuis Rhino (à gauche) et Pleiades (à droite)

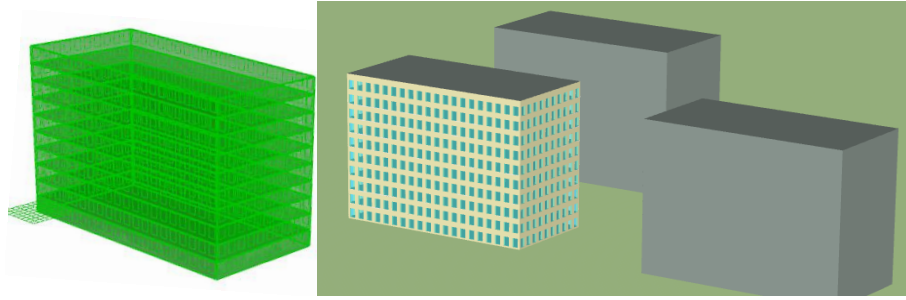


Figure 3 : Représentation 3D des petits bâtiments de bureaux depuis Rhino (à gauche) et Pleiades (à droite)

Les caractéristiques thermiques ont été choisies afin de proposer un cas d'étude performant. Chaque paroi, toiture et plancher contient 15 cm d'isolant, et du double vitrage basse émissivité est installé. La tour est considérée sans masque proche tandis que les trois bâtiments constituent mutuellement des masques proches comme illustré à droite de la figure 3, car une même parcelle est considérée pour les deux variantes. C'est également pour cette raison que seuls les impacts liés au bâti sont pris en compte, l'ajout des impacts liés au transport quotidien des occupants serait inutile car identique dans les deux cas, la tour et le groupement de bâtiments hébergeant le même nombre de travailleurs et étant situés au même endroit.

4. RESULTATS

4.1. STD

La simulation thermique dynamique indique un besoin annuel de chauffage d'environ 15 kWh/m² et un besoin de climatisation annuel de 5 kWh/m², pour une occupation des bureaux de 9h à 18h en semaine. Les besoins de chauffage de la tour sont inférieurs aux bâtiments de 10 étages d'environ 10 % car la compacité de la tour est plus importante. En contrepartie cette caractéristique implique une augmentation de plus de 20 % de la demande de climatisation en été. Cependant, bien que ces écarts soient non négligeables, les valeurs absolues étant relativement faibles dans ce cas de bâtiments performants, les impacts environnementaux associés le sont également.

4.2. ACV

L'ACV des deux variantes a été effectuée avec le logiciel Pleiades suite aux simulations thermiques dynamiques. On compare les impacts environnementaux de l'étape de construction afin de prendre en compte l'influence de la structure des bâtiments, puis on compare les impacts des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie.

4.2.1 Influence de la structure

Les deux variantes de bâtiments ont les mêmes quantités de matériaux par m² de surface utile exceptés les matériaux structurels et la toiture ; l'augmentation des impacts environnementaux de l'étape de construction présentée en figure 4 provient essentiellement de la structure. La construction de trois bâtiments de 10 étages nécessite moins de béton et d'acier dédiés aux fondations et à la superstructure du bâtiment que la construction d'une tour de 30 étages.

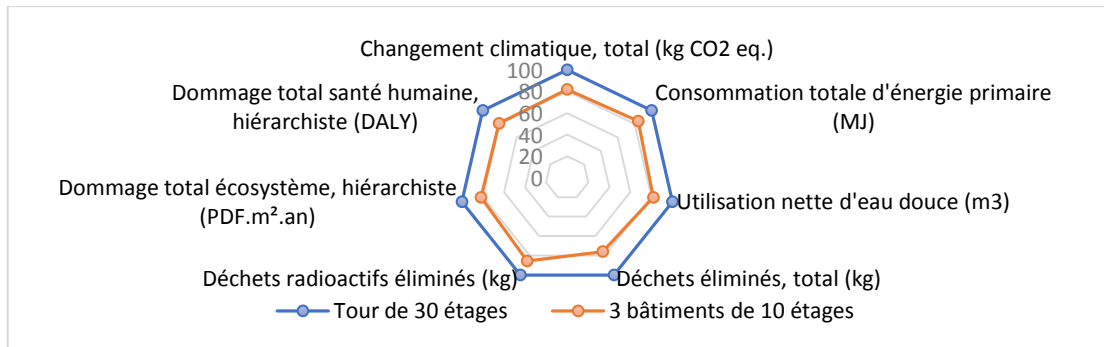


Figure 4 : Comparaison environnementale des deux variantes sur l'étape de construction

Les impacts sur le changement climatique, l'utilisation d'eau et les dommages à la santé et à la biodiversité sont environ 20 % plus faibles pour les trois petits bâtiments que pour la tour. L'écart est légèrement plus faible (15 %) pour les indicateurs de consommation d'énergie et de déchets radioactifs car la demande d'énergie primaire nécessaire à la fabrication des fenêtres et des équipements est élevée, et notamment la consommation d'électricité associée. La part de l'impact attribuée aux éléments structurels est donc plus faible concernant ces deux indicateurs. L'écart se creuse cependant pour les déchets éliminés ; naturellement, les quantités de béton et d'acier de la structure de la tour étant largement supérieures à celles des trois bâtiments de 10 étages, la masse de déchets à éliminer l'est également. Les trois bâtiments éliminent 24 % moins de déchets en masse que la tour de 30 étages.

4.2.2 Comparaison sur l'ensemble du cycle de vie

Les impacts environnementaux de l'étape d'utilisation des deux variantes de bâtiments sont majoritaires par rapport aux autres étapes du cycle de vie, pour une durée de vie fixée à 100 ans. Ainsi, bien que la tour génère environ 20 % plus d'impacts sur les différents indicateurs lors de l'étape de construction, l'évaluation environnementale des deux variantes de bâtiment sur l'ensemble de leur cycle de vie est similaire. Le graphique radar présenté en figure 5 montre que des effets de compensation sont présents et que les différences notées précédemment entre les deux variantes ne sont plus aussi frappantes.

L'importante quantité des matériaux structurels nécessaires à la construction de la tour de 30 étages se compense en partie par les impacts de la toiture et du plancher bas qui sont, pour ce qui concerne les matériaux de construction, multipliés par le nombre de bâtiments dans la seconde variante. Les planchers intermédiaires séparant les étages ne sont pas isolés et ont un impact inférieur à celui des parois horizontales extérieures. De plus, les besoins de chauffage sont plus élevés dans le cas des 3 bâtiments, du fait des déperditions par le plancher et la toiture qui sont multipliées par le nombre de bâtiments.

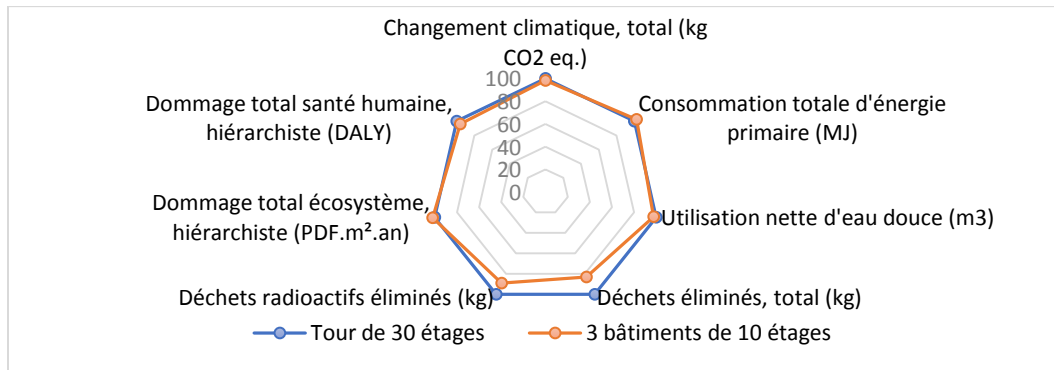


Figure 5 : Comparaison environnementale globale des deux variantes de bâtiments

5. DISCUSSION

La méthodologie a été appliquée sur deux variantes de conception différentes dont l'impact environnemental a pu être évalué. Toutefois, l'étude s'est limitée au bâti, et un mix électrique moyen annuel a été considéré. L'évaluation environnementale pourrait être complétée par l'intégration des matériaux et de la consommation énergétique liés aux ascenseurs, ou encore à la surface disponible pour installer une production d'énergie (panneaux solaires ou photovoltaïques). Les impacts de l'alimentation pourraient également être pris en compte, les bâtiments de 10 étages permettant le développement de l'agriculture urbaine sur leur toiture. L'emprise au sol des 3 bâtiments, plus élevée que celle de la tour, engendre un impact sur l'occupation des sols, pris en compte dans les dommages à la biodiversité. Toutefois, cette emprise au sol joue un faible rôle sur le total des impacts environnementaux.

L'adaptation du mix électrique permettrait également d'améliorer l'évaluation environnementale. En effet, le mix moyen annuel recense les technologies de production d'électricité utilisées au cours de l'année et calcule les impacts environnementaux correspondants. Un mix dynamique permettrait de prendre en compte l'évolution de l'utilisation des technologies heure par heure et donc de s'approcher des impacts réels. L'ACV attributionnelle considère un mix moyen, qui pourrait être remplacé par un mix marginal dans le cas de l'ACV conséquentielle. Dans ce cas, ce sont les conséquences du choix de conception qui seront évaluées : la demande d'énergie supplémentaire induite par le bâtiment, qui nécessitera de faire fonctionner un moyen de production disponible, ou au contraire la production d'électricité à travers le système photovoltaïque qui réduira la demande sur le réseau et évitera une production correspondant au mix marginal. Enfin, le mix évolue au cours du temps, il serait intéressant d'intégrer les scénarios prospectifs d'évolution du mix pour évaluer les étapes d'utilisation, de rénovation et de fin de vie qui vont se dérouler au cours des 100 prochaines années (Frapin et al. 2022).

6. CONCLUSION

Cet article a présenté une méthodologie permettant de lier la conception paramétrique et l'évaluation environnementale. L'étude de cas a montré la faisabilité du couplage entre un logiciel de conception dédié aux architectes et aux concepteurs et un outil de simulation thermique et d'évaluation environnementale des bâtiments. Il s'agit de sensibiliser les architectes et urbanistes aux conséquences de leurs choix de conception sur les impacts induits par leurs projets. Il serait possible d'automatiser le

processus et ainsi de créer de nombreuses variantes et de faciliter l'accès aux résultats thermiques et environnementaux. L'outil pourrait alors être utilisé en phase amont de conception des projets d'aménagement urbain.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Basic, S., A. Hollberg, A. Galimshina, et G. Habert. 2019. « A design integrated parametric tool for real-time Life Cycle Assessment - Bombyx project ». In . Vol. 323.
- Frapin, Marie, Charlotte Roux, Edi Assoumou, et Bruno Peuportier. 2022. « Modelling Long-Term and Short-Term Temporal Variation and Uncertainty of Electricity Production in the Life Cycle Assessment of Buildings ». *Applied Energy* 307 (février): 118141.
- Hollberg, Alexander, et Jürgen Ruth. 2016. « LCA in Architectural Design—a Parametric Approach ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (7): 943- 60.
- Lotteau, Marc, Philippe Loubet, Maxime Pousse, Emmanuel Dufrasnes, et Guido Sonnemann. 2015. « Critical Review of Life Cycle Assessment (LCA) for the Built Environment at the Neighborhood Scale ». *Building and Environment* 93 (novembre): 165- 78.
- Mendes, Baptiste. 2022. « Influence de la forme et du choix de matériaux de structure sur la performance environnementale des quartiers en phase amont ».
- Peuportier, Bruno, et Isabelle Blanc Sommereux. 1990. « Simulation Tool with Its Expert Interface for the Thermal Design of Multizone Buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109- 20.
- Wiberg, A.H., M.K. Wiik, H. Auklend, M.L. Slake, Z. Tuncer, M. Manni, G. Ceci, et T. Hofmeister. 2019. « Life cycle assessment for Zero Emission Buildings - A chronology of the development of a visual, dynamic and integrated approach ». In . Vol. 352.