

Évaluation automatisée de l'empreinte carbone dès les premières phases de conception : Proposition d'une approche nouvelle basée sur la modélisation des modes constructifs.

Catherine Bouillon^{1, 2, 3}[0000-0001-8553-0155], Benjamin Cohen Boulakia⁴[0000-0002-4812-5545], Karim Beddiar³[0000-0003-4092-7495], Yves Jaboin¹[0009-0004-2028-3746], Fabrice Duval⁵[0000-0001-8825-9321]

¹ ESSOR Group, 2 rue Pierre Gilles de Gennes, 64140 Lons, France

² Arts et Métiers Paris, ENSAM, 151 Boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

³ CESI LINEACT, 1 Avenue Augustin-Louis Cauchy, 44307 Nantes, France

⁴ EFREI, 32 Avenue de la République, 94800 Villejuif, France

⁵ CESI LINEACT, 80, Avenue Edmund Halley Rouen Madrillet Innovation, 76800 Saint-Etienne-du-Rouvray, France

(auteur correspondant : catherine.bouillon@essor.group)

Résumé. La réduction de l'impact environnemental des activités humaines dans l'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC) est une préoccupation mondiale majeure. Cet article examine de manière critique le potentiel de la conception de bâtiments durables grâce à l'agrégation de voxels solides et à la modélisation 3D de maquettes numériques à différents niveaux d'automatisation. L'objectif de la méthodologie présentée est de maintenir la créativité du concepteur en tirant parti des points forts de ces paradigmes. Pour ce faire, les processus de construction sont décomposés selon une nomenclature de fabrication dont les données sont établies à partir de l'*analogon* du projet, permettant ainsi une Analyse du Cycle de Vie (ACV) automatique. Les estimations fournies par ce modèle, émuloées à partir des informations disponibles lors de la phase d'esquisse, sont ensuite discutées en comparaison des résultats obtenus dans le cadre de sept projets réels. Une erreur de moins de 5 % démontre l'efficacité du cadre d'évaluation multi-échelle de la méthodologie proposée. Enfin, on peut affirmer que, au regard des informations disponibles lors de la phase de conception finale, l'ACV obtenue est conforme à la réglementation en vigueur.

Mots-clés : Empreinte carbone, Phase de conception précoce, Modèle constructif.

1 Introduction

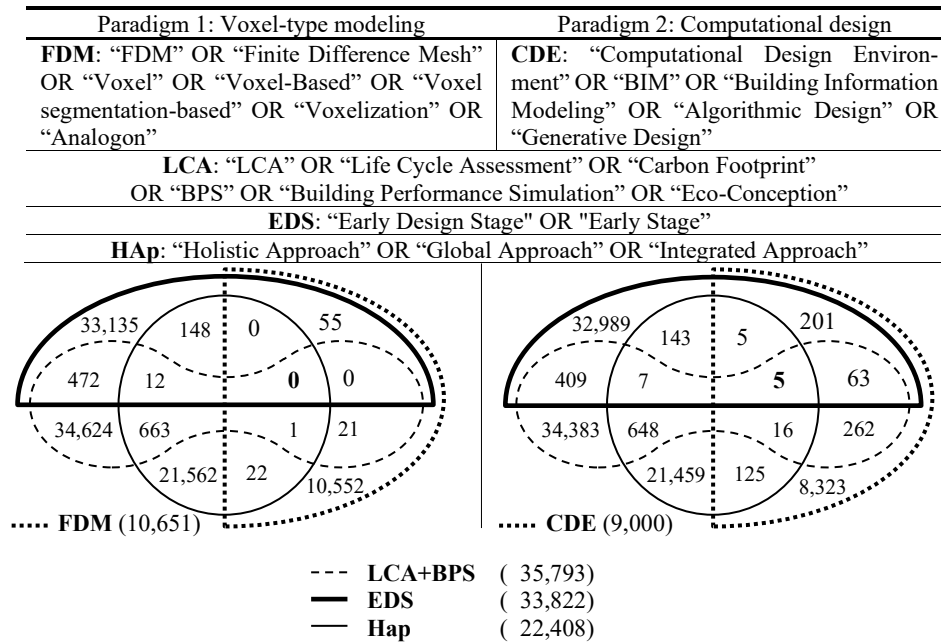
Le changement climatique est une préoccupation mondiale primordiale. A ce titre, les activités humaines, en particulier dans l'industrie de l'AEC, sont identifiées comme des contributeurs importants [1][2]. Les mesures mises en œuvre par de nombreux pays industrialisés pour réduire les émissions de carbone opérationnel ont conduit par inadvertance à une augmentation de la production de carbone intrinsèque [3][4]. Pour compenser ce problème, il est essentiel d'intégrer de façon holistique les études d'impact environnemental dès les premières étapes de la conception [5]. Deux paradigmes

scientifiques abordent cette question : l'un, architectural, qui exploite les primitives topologiques d'un analogon [6], et l'autre, technologique, qui tend à coupler l'ACV et la conception numérique [7] à différents niveaux d'automatisation [8]. Cependant, des défis persistent dans l'identification et la quantification des éléments de construction. Dès lors, la question suivante se pose : *Comment assurer une évaluation complète de l'empreinte carbone dès les premières phases de conception, de manière cohérente et continue ?*

La section 2 passe en revue de manière critique les approches permettant aux concepteurs de faire des choix éclairés [9]. Ensuite, la section 3 présente un modèle d'empreinte carbone susceptible d'impacter la conception future de bâtiments durables. Ce modèle est validé par des simulations impliquant sept études de cas. La section 4 détaille le cadre de ces essais et analyse les résultats obtenus à partir des informations disponibles en phase d'esquisse, au regard des évaluations environnementales menées à terme. Les principales conclusions et les recherches futures sont décrites à la section 5.

2 Analyse de l'état de l'art

Table 1. Venn diagram of the bibliographic review since 2015.



Dans l'industrie de l'AEC, deux paradigmes facilitent la prise de décision éclairée pour les concepteurs. L'un est basé sur un analogon (également connu sous le nom de maillage par différences finies), obtenu en discrétisant une structure en éléments polyédriques (voxels), tandis que l'autre repose sur un modèle construit en assemblant des composants dans un environnement de conception informatique (CDE).

Cette analyse explore l'état de l'art correspondant à chacun de ces paradigmes à l'aide de quatre mots-clés, dont trois sont communs. Le concept de simulation de la performance des bâtiments (BPS) est ajouté en raison de la similitude entre les approches correspondantes et l'ACV. Ces mots clés ont été choisis compte-tenu de leur large portée afin d'identifier la sélection d'études pertinentes la plus exhaustive. Pour assurer une revue complète et rigoureuse de la littérature, les mesures suivantes ont été prises : 1) définir les mots-clés et les chaînes de recherche ; 2) effectuer les recherches dans les bases de données Scopus et Web of Science ; 3) éliminer les doublons. Les résultats de la recherche bibliographique menée conformément à ce processus sont résumés dans le tableau 1 et détaillés ci-dessous.

Dans le cadre du premier paradigme, la modélisation basée sur les voxels apparaît comme la méthode la mieux adaptée pour représenter la géométrie d'un bâtiment [10], offrant un avantage notable en termes de simplicité par rapport aux quatre autres alternatives. Les articles sélectionnés traitent d'une représentation solide des voxels, où chaque primitive (faces et contenu) est caractérisée par un ensemble d'attributs [11]. De nombreux auteurs parlent de maillage 3D à différences finies [12]. Selon [13], un tel maillage spatial est une approche de modélisation optimale pour appliquer des méthodes de volumes finis, en particulier en vue d'intégrer la dynamique des fluides numérique (CFD) dans la simulation de la performance des bâtiments (BPS). Tyc et al. [6] présentent une analyse du champ d'application des modèles Voxel visant à faciliter l'intégration de données multi-domaines dans la conception architecturale et urbaine.

En ce qui concerne le paradigme 2 (CDE), Caetano et al. [8] fournissent une taxonomie précise des domaines d'application des relations entre les composants basés sur la conception paramétrique (PD) et la conception générative (GD) basée sur des données provenant de diverses sources, conception algorithmique (AD) incluse. Une analyse approfondie du couplage ACV+PD, notamment par le biais du Building Information Modeling (BIM), souligne les défis et les opportunités inhérents à une telle fusion sous divers point de vue [14][15][16]. Plus précisément, [17] introduit une méthodologie facilitant l'évaluation simultanée du carbone incorporé et de l'énergie grise. À un niveau d'automatisation plus élevé, la capacité de la conception générative basée sur la performance (PBGD) à résoudre des problèmes contraints est reconnue [7]. Cette affirmation est soutenue par [18] dans le contexte environnemental. Cependant, la méthodologie utilisée se concentre uniquement sur l'optimisation de la forme et de la taille des bâtiments, négligeant la sélection des matériaux. De plus, pour employer une telle approche, l'auteur a été contraint de confiner l'espace de la solution avec des objectifs et des contraintes de conception prédéfinis par une enquête exploratoire du processus de prise de décision inhérent à la conception d'un bâtiment. Cet aspect explique probablement l'affirmation de plusieurs auteurs selon laquelle la PBGD ne répond pas aux attentes des concepteurs [19]. En outre, [20] souligne qu'en plus des défis d'interopérabilité technique mal gérés [21], ces outils offrent une marge de manœuvre limitée pour la créativité. D'autre part, [22] critique la qualité des alternatives de conception proposées, citant un haut niveau d'expertise requis, malgré l'utilisation de langages de programmation visuels (VPL), et une nature chronophage qui empêche toutes applications en temps réel [23].

En résumé, malgré sa nature réglementaire (ISO/TC 59/SC 17) et sa large reconnaissance [24], la mise en œuvre de l'ACV est rendue obsolète lorsque les niveaux de détail (LOD) sont réduits, ce qui est particulièrement le cas lors des premières itérations de conception. Compte tenu du fort potentiel de changement et des faibles implications économiques à ce stade [25], de nombreux articles proposent des alternatives pour surmonter cette dualité. Les approches les plus efficaces sont, d'une part, la définition d'estimateurs globaux (compacité, couverture d'ombre, performance thermique), dans le cadre d'approches d'écoconstruction basées sur les voxels [26], et d'autre part, le développement de méthodologies d'ACV simplifiées et adaptées aux besoins de la CDE [27]. Les études comparatives menées au cours de la dernière décennie révèlent que l'imprécision de ces alternatives a diminué. En 2014, 20 % ont été déclarés [28], suivis de 30 % [29] et entre 5 % et 10 % [30] en 2018, puis 12 % en 2019 [31]. Néanmoins, un défi de taille persiste : toutes ces approches nécessitent un changement de méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux en cours de conception, un processus coûteux en temps et surtout qui perturbe l'approche durable développée par le concepteur.

En revanche, deux observations sont faites. Tout d'abord, l'utilisation de modèles conceptuels basés sur des voxels offre aux concepteurs un potentiel important de créativité, puisqu'elle permet aux concepteurs d'explorer librement les formes, de visualiser de manière réaliste leurs idées, de simuler les comportements et d'itérer rapidement sur les concepts [26]. Deuxièmement, seule une nomenclature de fabrication est nécessaire pour déterminer l'ACV réglementaire, les quantités étant simplement multipliées par les valeurs des ensembles de données respectifs d'une base de données réglementaire [32][33].

3 Proposition d'une nouvelle approche basée sur des modes constructifs

Le concept entrepris repose sur trois principes clés tirés de la revue de la littérature. Tout d'abord, l'utilisation de voxels solides permet de définir en amont les volumes et les attributs d'un projet. Deuxièmement, l'ACV réglementaire nécessite une définition précise des macro-composants utilisés. Enfin, la créativité du concepteur est primordiale ; il est donc essentiel de caractériser systématiquement et précisément les choix effectués à chaque itération de conception. La cohérence entre ces énoncés est assurée par le fait de considérer la conception d'un bâtiment comme une combinaison séquentielle de modes constructifs. En effet, une telle approche établit une relation entre la définition topologique d'un projet et ses éléments constitutifs sans entraver la liberté du concepteur en termes de cohérence esthétique, structurelle et fonctionnelle.

Le concept de modes constructifs fait ici référence à un cluster caractérisé par un nom et composé d'un ensemble prédéfini d'éléments de construction [34]. Le principe de base est de permettre au concepteur de définir conjointement, à chaque itération de conception, la topologie du projet et de sélectionner nominalement les modes constructifs associés, tandis qu'une nomenclature est systématiquement générée. Il s'agit dès lors de développer une procédure automatique combinant une Interface Homme-Machine (IHM) et un générateur automatique de nomenclature. L'objectif de ce dernier est

de synthétiser l'inventaire du cycle de vie (ICV) et l'évaluation de l'impact du cycle de vie (EIV) conformément à l'approche présentée par [35]. Pour ce faire, chaque élément de construction est décomposé en un ensemble valué d'unités de fabrication, chacune d'elles étant ensuite décomposée en un sous-ensemble valué de composants de fabrication.

Les grandeurs liées aux unités de fabrication (*ex. volume d'une dalle*) dépendent de la topologie du projet, elles sont donc soumises à une modélisation dynamique. En revanche, la composition des composants de fabrication (*ex. composition du béton C25/30*) ne dépend que de la distribution des macro-composants impliqués (*ex. imposée par la NF EN 206/CN*) et adresse donc une modélisation statique. La figure 1 ci-dessous présente ce concept sous forme de diagramme, chaque partie étant détaillée dans les sections suivantes.

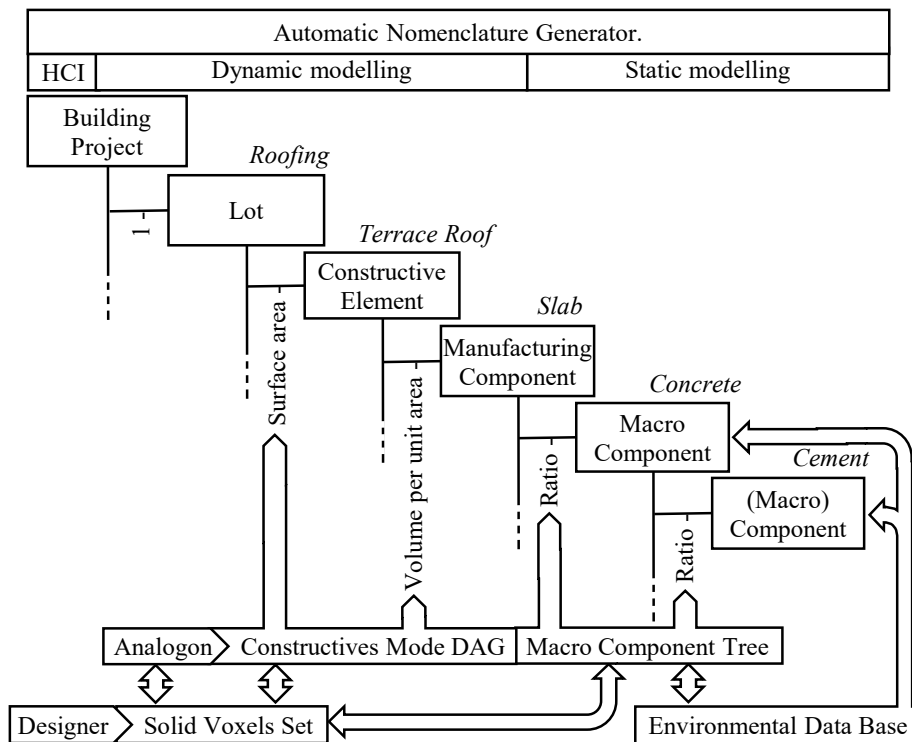


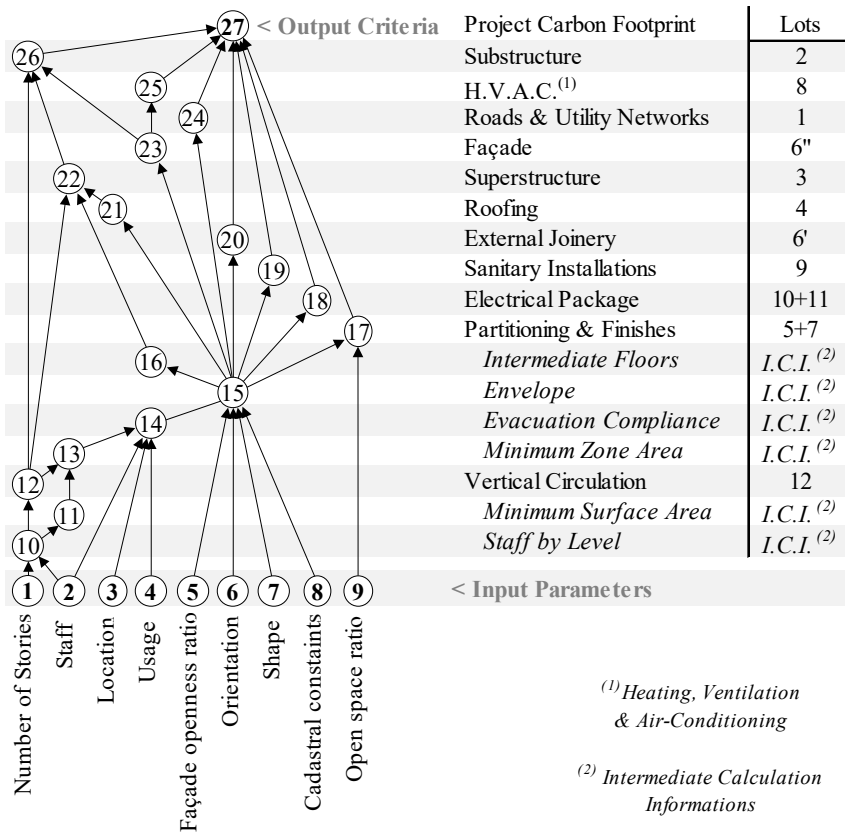
Fig. 1. Représentation schématique du modèle de mode constructif.

Une approche exploratoire d'un ensemble représentatif de sept projets réalisés (bâtiments tertiaires) par le groupe ESSOR est entreprise pour formaliser le processus de définition des nomenclatures utilisées en fin de conception pour définir ACV réglementaire. Il est à noter que la représentativité de ces projets est limitée par un seul type de vitrage, l'absence de balcons, et une hauteur de niveau quasi constante ($3\text{m} \pm 5\%$) : toutes

les informations relatives à ces trois aspects sont donc considérées constantes et n'apparaissent pas comme paramètres dans les étapes ultérieures de cette étude.

Chacun des modes opératoires génériques identifiés est structuré hiérarchiquement via un graphe acyclique dirigé (DAG, voir Tableau 2), où les feuilles correspondent aux paramètres d'entrée, les nœuds internes représentent les données, les arcs symbolisent les contraintes de précédence induites par les équations définissant ces données et la racine unique correspond à la valeur finale (ici, l'estimation globale de l'empreinte carbone). À ce stade, le DAG se compose de vingt-deux paramètres d'entrée et de trente points de données intermédiaires.

Tableau 2. DAG des modes constructifs et définition des différents terrains à bâtir.



Une réduction de la dimensionnalité du problème est ensuite réalisée (à l'aide du logiciel mode-FRONTIER[®]) en fonction de la dépendance linéaire de chaque paire de données, puis en fonction de l'influence ordonnée des paramètres de calcul. Les seuils appliqués sont une valeur absolue du coefficient de corrélation de Pearson de 0,999 et une contribution cumulative de 97 %. La deuxième synthèse qui en résulte ne comprend plus que dix-sept points de données intermédiaires, dont douze correspondent à des définitions de lots (voir tableau 2). Un examen complet des paramètres d'entrée révèle

l'existence de treize blocs d'information correspondant à des attributs de voxels solides. Ceux-ci sont donc considérées comme des informations de mode constructif sélectionnées par le concepteur lors de la définition topologique du projet. Par conséquent, seuls neuf paramètres d'entrée sont retenus (voir tableau 2) pour configurer la modélisation volumétrique présentée ci-après.

Aspects structurels. Les unités de discrétisation élémentaires utilisées sont des voxels solides parallélépipédiques. Une structure macroscopique est créée sous la forme d'un diagramme qui représente le voxel. Ainsi, la liste classique des primitives géométriques fondamentales (coordonnées spatiales et liens d'adjacence) et des propriétés (matérialité, opacité, etc.) attachées aux voxels est étendue à un ensemble d'attributs qui définissent les éléments de construction qui lui sont associés (voir Fig. 2).

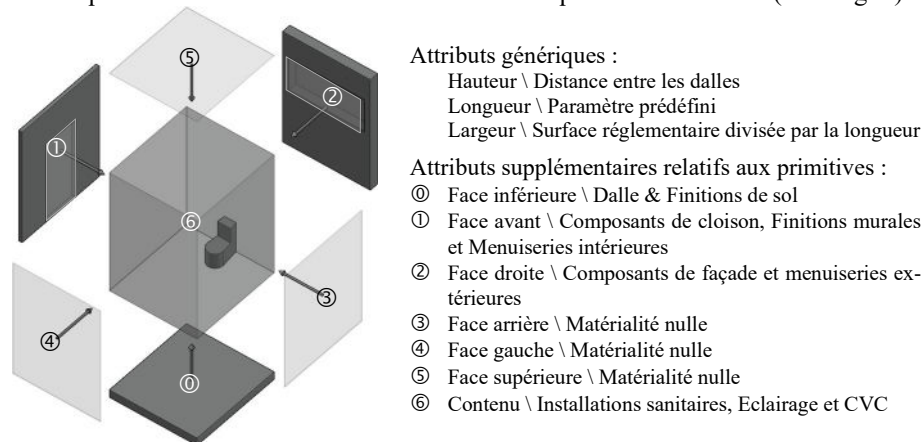


Fig. 2. Vue éclatée conceptuelle des voxels solides macroscopiques créés : Exemple prédéfini correspondant à une zone de installations sanitaires.

En conséquence, l'interface utilisateur se compose du processus traditionnel d'agrégation de voxels combiné à une procédure de sélection des modes constructifs mettant en œuvre des menus déroulants et un moteur d'inférence qui initialise des attributs supplémentaires. Certains attributs, tels que le volume et la surface des faces de voxel, sont définis de manière redondante pour optimiser les temps de calcul entre les itérations. D'autres, tel que la résistance thermique, sont calculés en fonction des paramètres de macro-composants ou définis conformément à la réglementation en vigueur, tel que l'éclairage.

Aspects géométriques. Les voxels sont pré dimensionnés en fonction du type de zone à laquelle ils sont affectés (sanitaires, espaces de travail, zones de circulation, etc.), puis agrégés par le concepteur dans un espace contraint prédéfini par les neuf points de données d'entrée.

Les contraintes d'usage, d'emplacement et de cadastre sont utilisées pour définir les règles topographiques réglementaires telles que les dimensions, les emplacements interdits, les contraintes d'alignement, les retraits, les hauteurs, etc. Le nombre d'occupants, le nombre de niveaux et la forme (respectivement l'orientation et le taux

d'ouverture par façade, et la proportion d'espace ouvert) sont utilisés pour prédéfinir les volumes fonctionnels (respectivement l'enveloppe et le cloisonnement). Une fois chaque voxel attribué, les voxels dédiés aux zones de circulation sont redimensionnés conformément à la réglementation relative à la sécurité et à l'évacuation des occupants. Ce processus automatique ajuste en conséquence la définition des autres familles de voxels. Le critère appliqué est la minimisation de la compacité ($C = S^3/V^2$, où S est la surface de l'enveloppe extérieure et V le volume intérieur créé). Ce paramètre est normalisé par rapport à la compacité d'une sphère (36π).

À ce stade, le DAG des modes constructifs n'est qu'une nomenclature de composition. Par conséquent, il est impératif de poursuivre cette première décomposition par une définition des éléments de construction sous la forme de macro-composants de plus en plus fins jusqu'à l'obtention d'un bilan des éléments de fabrication (matériels et immatériels) ; autrement dit, la génération d'un ICV (Inventaire de Cycle de Vie). Concernant les nouvelles branches du DAG ainsi générées, les feuilles sont définies conformément aux Formulaire de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) fournis par des organismes accrédités tels que la base de données française INIES et la pondération des arcs est égale au rapport entre la contribution du nœud de destination dans la formation du nœud d'origine. Finalement, chaque feuille du DAG est directement connectée à son élément jumeau de la base de données environnementale. Chacune de ces connexions est pondérée par le rapport entre l'unité fonctionnelle, qui caractérise l'élément de référence, et l'unité par le modèle.

Dans le cas particulier de la France, un module de conversion des données d'entrée de la base INIES est inséré aux fins de disposer de paramètres conformes à une ACV dynamique.

Dès lors, le DAG représente l'ICV du projet.

4 Test de modèle

Sept projets précédemment réalisés par le Groupe ESSOR ont été retenus comme études de cas (voir tableau 3).

Table 3. Summary of the tested projects.

Case study	Sketch phase	Final phase	Location		Shape	Number of floors	Number of Occupants	Orientation	Façade Openness Ratio	Open Space Ratio
			longitude	Latitude						
1	09, 2021	10, 2023	43.54520	1.38614	□	6	320	S	65%	80%
2	05, 2018	03, 2019	47.22219	-1.62040	□	8	590	S	40%	80%
3	04, 2023	01, 2024	43.32857	-0.35717	□	3	190	SW	35%	16%
4	05, 2021	08, 2023	43.60079	1.35044	□	3	380	W	55%	85%
5	05, 2019	02, 2020	47.03593	-0.95735	L	2	130	SE	30%	90%
6	02, 2017	10, 2017	43.47098	-1.59475	L	3	150	E	40%	70%
7	10, 2021	09, 2022	43.58066	1.51656	L	2	230	SW	60%	55%

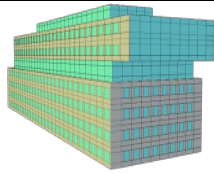

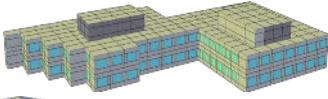

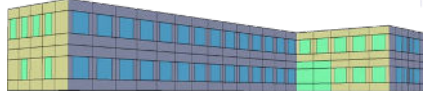

Les critères de sélection appliqués sont l'exhaustivité des informations disponibles concernant les phases d'esquisse et de conception finale, ainsi que la cohérence du

projet entre ces deux phases extrêmes (aucune modification significative des principes du projet pendant le processus de conception). La robustesse du modèle implémenté dans l'environnement MS Excel[®] est évaluée pour chaque cas test en comparant les valeurs d'impact carbone prédites par le modèle, émuloées par les informations relatives à la phase d'esquisse, avec les résultats de l'ACV réglementaire réalisée à la fin de la phase de conception. Les résultats sont analysés à deux niveaux. Le premier est la représentativité de l'analogon et le second est l'erreur de prédiction du modèle. Les résultats sont présentés par lots et tous corps d'état confondus.

Dans les résultats exposés ci-après, les voxels macroscopiques sont représentés par des blocs de couleur beige, à l'exception des faces vitrées (attribuées à une opacité nulle) qui sont colorisées en cyan (voir tableau 4).

En termes de représentativité, on peut observer que les porte-à-faux et les terrasses, résultant de contraintes architecturales telles que les volumes bloqués, sont bien représentés (voir Tableau 4, Projet #2). En revanche, les contraintes cadastrales, telles qu'un alignement oblique, sont mises en défaut par le format orthogonal des voxels (voir Tableau 4, Projet #4). Bien que la forme et la disposition des ouvertures ne soient pas représentatives (voir Tableau 4 - Projet #7), on constate que leur orientation moyenne est cohérente, même dans le cas d'une façade oblique (voir Tableau 4 - Projet #4).

#2 Comparaison de trois cas d'étude significatifs entre l'analogon et le modèle final.

#	Analogon	Final model
#2		
#4		
#7		

L'analyse des estimations lot par lot d'empreinte carbone révèle, d'une part, que le modèle est insensible aux variations de forme, sauf pour le lot #1 (Voiries et Réseaux Divers), pour lequel les cas en forme de L sont surestimés, et, d'autre part, que la dispersion des écarts tend à s'équilibrer (voir Fig. 3). La précision du modèle appliqué en phase d'esquisse est dès lors démontrée ($-3\% \pm 2,5\%$) par rapport à l'écart de 12% qui caractérise les méthodes semblables selon [35] en 2019.

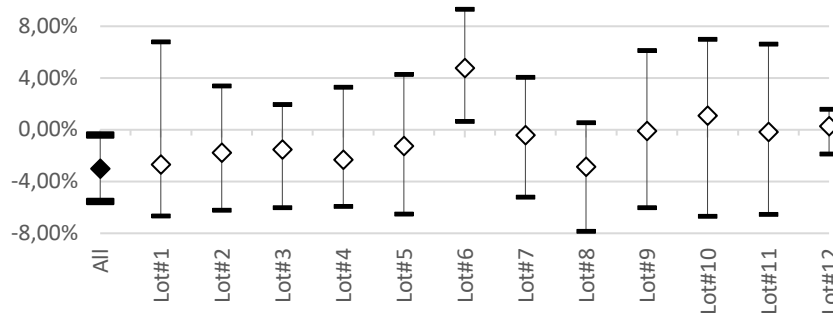


Fig. 3. Diagramme de dispersion de l'erreur d'empreinte carbone de Lot.

Le modèle de chaque projet a ensuite été testé sur la base de toutes les informations disponibles à la fin de la phase de conception. Les résultats obtenus sont égaux à ceux de l'ACV de référence. Ainsi, les résultats montrent clairement que le modèle développé ne présente aucune perte d'informations essentielles.

Le temps de calcul entre deux itérations n'est pas significatif. Le temps de paramétrage complet d'un projet est inférieur à trois heures et tend à diminuer avec l'expérience acquise sur les projets traités, sachant que plus de la moitié de ce temps est consacrée à la définition des contraintes topologiques.

Pendant, l'utilisation de voxels prismatiques et d'une résolution plus élevée devrait être exploré. L'utilisation d'un langage de programmation plus rapide que Microsoft® Visual Basic (ex. C++) pourrait alors permettre d'obtenir un compromis efficace entre la représentativité et le temps de calcul.

5 Conclusion et travaux ultérieurs

Le suivi holistique des impacts environnementaux dès les premières phases de conception est une préoccupation prépondérante pour l'industrie de l'AEC, en particulier compte tenu de la tendance dominante vers des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle. Une revue complète de la littérature révèle deux paradigmes clés : la modélisation volumétrique à l'aide d'approches basées sur les voxels et le couplage ACV+CDE à différents niveaux d'automatisation. Bien que ces paradigmes offrent des avantages distinctifs, ils présentent également des défis liés à l'identification et à la quantification précises des éléments de construction.

La méthodologie présentée dans cet article considère la conception du bâtiment comme une combinaison séquentielle de modes constructifs, offrant une méthodologie systématique pour évaluer l'empreinte carbone du projet tout au long du processus de conception itérative. Cette approche originale permet aux concepteurs d'établir une relation cohérente entre les mesures volumétriques et les éléments constitutifs, tout en assurant aux concepteurs une totale liberté en termes de créativité et la continuité des stratégies de durabilité déployées.

Cette approche, basée sur la voxélisation macroscopique et la modélisation hiérarchique de la nomenclature des macro-composantes, a été éprouvée sur un ensemble de sept projets achevés. Les résultats démontrent l'efficacité du modèle pour estimer

précisément les empreintes carbone lors de la phase d'esquisse, avec des calculs effectués en temps réel et des performances constantes quel que soit la typologie des projets. De plus, en complétant les informations émulées conformément aux descriptifs disponible en phase terminale de conception, on constate que les mêmes modèles fournissent directement une ACV précise et réglementaire. Le caractère prédictif et autonome de cette méthodologie permet donc aux concepteurs de prendre des décisions éclairées pour relever les défis de neutralité carbone des bâtiments.

Cependant, la représentativité visuelle du modèle est contrainte par des unités spatiales parallélépipédiques. Par conséquent, pour améliorer cet aspect, il est recommandé d'explorer le potentiel des voxels prismatiques. De plus, la mise en œuvre du formalisme de discrétisation en voxels permet d'entreprendre d'autres développements ; notamment l'intégration avec des concepts tels que l'urbanisme et les systèmes intelligents (smart systems), ainsi que l'analyse des structures existantes cartographiées à l'aide de systèmes mobiles (par exemple, Microsoft© HoloLens ou Matterport) associée à une méthode rigoureuse de reconstruction entièrement automatique [36].

Ces travaux ouvrent une perspective exploratoire sur l'expérimentation multicritère visant à valider l'architecture multi-échelle de ce modèle et, plus précisément, sa capacité à être connecté simultanément à différentes bases de données de référence (ex. impact environnemental, coût global, voire durée de réalisation), tandis que les données scalaires sont simplement remplacées par des vecteurs, dont chaque élément représente un critère. De plus, le défi de l'aide à la décision pour la conception de bâtiments durables est important et cette étude ne s'est concentrée que sur une petite fraction de celui-ci. Par conséquent, proposer aux concepteurs d'être guidés vers une prise de décision éclairée dans des espaces de solutions multi-objectifs est une direction qui mérite d'être explorée de façon plus approfondie.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) et le Groupe ESSOR pour le cofinancement de cette recherche et la fourniture des études de cas.

Références

1. Bahramian M. and Yetilmezsoy K.: Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy Build.*, vol. 219, p. 109917 (2020).
2. Basic S., Hollberg A., Galimshina A., and Habert G.: A design integrated parametric tool for real-time Life Cycle Assessment – Bombyx project. *IOP conference series: earth and environmental science*, p. Vol. 323, No. 1, 012112 (2019).
3. IEA, 2020, *Global Status Report of the International Energy Agency*.
4. Ajayi, S. O., Oyedele, L. O., and Ilori, O. M.: Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources. *Journal of Building Engineering*, 23, 324-333 (2019).
5. Li S, Liu L and Peng C.: A review of performance-oriented architectural design and optimization in the context of sustainability: dividends and challenges. *Sustainability*; 12(4): 1427 (2020).

6. Tyc J, Selami T, Hensel DS, Hensel M.: A Scoping Review of Voxel-Model Applications to Enable Multi-Domain Data Integration in Architectural Design and Urban Planning. *Architecture*, 3(2):137-174 (2023).
7. Obrecht T. P., Röck M., Hoxha E., and Passer A.: BIM and LCA integration: A systematic literature review. *Sustain.*, vol. 12, no. 14 (2020).
8. Caetano I., Santos L., and Leitão A.: Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. *Front. Archit. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 287–300 (2020).
9. Bach R., Mohtashami N., and Hildebrand L.: Comparative overview on LCA software programs for application in the façade design process. *J. Facade Des. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 13–26 (2019).
10. Meng, L. & Forberg, A. 2007. 3D Building Generalisation. Chapter 11 in *Challenges in the Portrayal of Geographic Information: Issues of Generalisation and Multi Scale Representation*, Mackaness, W., Ruas, A. & Sarjakoski, T., Eds. Amsterdam: Elsevier Science.
11. Kaufman, A., Cohen, D. & Yagel, R.: Volume Graphics. In *IEEE Computer*. Vol. 26, No. 7, pp. 51-64 (1993).
12. Goldstein, R., Breslav, S., & Khan, A.: Towards voxel-based algorithms for building performance simulation. In *Proceedings of the IBPSA-Canada eSim Conference* (2014).
13. Beausoleil-Morrison, I.: The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation (Doctoral dissertation, University of Strathclyde) (2000).
14. Karunaratne, S., & Dharmarathna, D.: A review of comprehensiveness, user-friendliness, and contribution for sustainable design of whole building environmental life cycle assessment software tools. *Building and Environment*, 108784 (2022).
15. Kamari, A., Kotula, B. M., & Schultz, C. P. L.: A BIM-based LCA tool for sustainable building design during the early design stage. *Smart and Sustainable Built Environment*, 11(2), 217-244 (2022).
16. Onososen, A., Musonda I.: Barriers to BIM-based life cycle sustainability assessment for buildings: an interpretive structural modelling approach. *Buildings*, 12 (3) (2022).
17. Alwan, Z., Nawarathna, A., Ayman, R., Zhu, M., and ElGhazi, Y.: Framework for parametric assessment of operational and embodied energy impacts utilising BIM. *Journal of Building Engineering*, 42, 102768 (2021).
18. Zaraza, J., McCabe, B., Duhamel, M., and Posen, D.: Generative design to reduce embodied GHG emissions of high-rise buildings. *Automation in Construction*, 139, 104274, (2022).
19. Ma W., Wang X., Wang J., Xiang X., and Sun J.: Generative design in building information modelling (Bim): Approaches and requirements. *Sensors*, vol. 21, no. 16, pp. 1–26 (2021).
20. Afandi, A. : *Approches méthodologiques et logicielles pour la prise de décision et la conception paramétrique optimisée de bâtiments modulaires*. PhD Thesis, Université de Bordeaux, France (2020).
21. Kiss, B., and Szalay, Z.: Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings. *Automation in Construction*, 111, 103044 (2020).
22. Davis D.: Generative design is doomed to fail. Retrieved October, 2020
23. Poinet, P.: *Enhancing Collaborative Practices in Architecture, Engineering and Construction through Multi-Scalar Modelling Methodologies*” PhD thesis (2020).
24. Sartori T., Drogemuller R., Omrani S., and Lamari F.: A schematic framework for Life Cycle Assessment (LCA) and Green Building Rating System (GBRS). *J. Build. Eng.*, vol. 38, no. December 2020, p. 102180 (2021).
25. Hollberg A.: *Parametric Life Cycle Assessment: Introducing a time efficient method for environmental building design optimization*. Bauhaus-Universitätsverlag Weimar (2017).

26. Marin, P. : Numérisation du réel, un regard sur le flux informationnel en architecture. Doctoral dissertation, Université de Lille (2020).
27. Hassan, S. R., Megahed, N. A., Eleinen, O. M. A., & Hassan, A. M.: Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support, *Energy and Buildings*, 267, 112144 (2022).
28. Bonnet, R.; Hallouin, T.; Lasvaux, S.; Galdric, S. Simplified and reproducible building life cycle assessment: Validation tests on a case study compared to a detailed LCA with different user's profiles. In *Proceedings of the World SB14 Barcelona Conference*, Barcelona, Spain, 28–30 October 2014.
29. Meex E., Hollberg A., Knapen E., Hildebrand L., and Verbeeck G.: Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Build. Environ.*, vol. 133, pp. 228–236 (2018).
30. Marsh, R., Nygaard Rasmussen, F., & Birgisdottir, H.: Embodied carbon tools for architects and clients early in the design process, *Embodied Carbon in Buildings: Measurement, Management, and Mitigation*, 167-190 (2018).
31. Zimmermann, R. K., Kanafani, K., Rasmussen, F. N., & Birgisdottir, H.: Early design stage building LCA using the LCAByg tool: comparing cases for early stage and detailed LCA approaches, In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 323, No. 1, p. 012118 (2019).
32. Di Bari, R., Horn, R., Bruhn, S, Alaux, N., Ruschi Mendes Saade, M, SoustVerdaguer, B, Potrč Obrecht, T., Hollberg, A., Birgisdottir, H., Passer, A., Frischknecht, R.: Buildings LCA and digitalization: Designers' toolbox based on a survey. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1078 (2022).
33. Di Santo, N., Guante Henriquez, L., Dotelli, G., and Imperadori, M.: Holistic approach for assessing buildings' environmental impact and user comfort from early design: A method combining life cycle assessment, BIM, and active house protocol. *Buildings*, 13(5), 1315 (2023).
34. Beddiar, K., Cléaux, A., Chazal, P. : *Construction hors-site*. Dunod. ISBN : 9782100811335 (2021).
35. Lasvaux, S., Gantner, J., Schiopu, N., Nibel, S., Bazzana, M., Bosdevigie, B., Sibiude, G.: Towards a new generation of building LCA tools adapted to the building design process and to the user needs. *Proceedings of the International Conference on Sustainable Buildings, Construction products and Technologies. (SB13)*, Graz, Austria (2013).
36. Wang, B., Wu, G., Zhao, Q., Li, Y., Gao, Y., & She, J.: A topology-preserving simplification method for 3d building models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(6), 422 (2021).