
Un *Building Information Modeler* comme support d'un bâtiment modulaire

Anabelle Rahhal¹, Vincent Delfosse¹, Christelle Boulanger¹, Cyril Lorquet¹, Pierre Leclercq¹

¹Université de Liège, LUCID, Département ArGEnCo

mail: a.rahhal / vincent.delfosse / christelle.boulanger / cyril.lorquet / pierre.leclercq @ulg.ac.be

RÉSUMÉ. Dans cet article, nous présentons un *Building Information Modeler* mis en œuvre pour la création, la visualisation et l'évaluation des performances d'un projet de bâtiment modulaire, s'appuyant sur une maquette numérique.

Nous exposons, dans un premier temps, le contexte et la mise en place de l'approche choisie, dite « par composants » et de sa notion centrale de « catalogue », capable de supporter la virtualisation du système constructif dans le modeler. Dans un second temps, nous décrivons l'architecture logicielle mise en place pour ce modeler original, qui repose sur un modèle de données à double objectif : il s'agit de représenter les catalogues de composants et de permettre l'encodage d'un projet précis. Ensuite, notre article présente les produits obtenus, en termes d'exploitation des informations géométriques et sémantiques des composants de ce catalogue. En particulier, il montre comment, en fonction du type d'activité conduite, ces productions peuvent être générées sous différents formats d'exploitation. Enfin, l'article présente les limites de ce *Building Information Modeler* et les possibilités futures ouvertes par son extensibilité.

ABSTRACT. In this article, we present a *Building Information Modeler* essential for creating, viewing and evaluating the performance of a modular building project, based on a digital model. First, we explain our approach, called "by components" and its central notion of "catalog", capable of supporting the virtualization of the construction system in the modeler. Secondly, we describe the software architecture established for this original modeller, based on a dual-purpose data model: representing the catalogs of components and allowing the encoding of a specific project within the software. Then, our article will introduce the products obtained, in terms of operating geometric and semantic information from the catalog components. In particular, it will show how, depending on the driving activity types, these productions can be generated under different operating formats. Finally, the article will introduce the limits of this *Building Information Modeler* and the future opportunities provided by its extensibility.

MOTS-CLÉS: BIM, catalogue, composants, architecture, modularité, évaluation des performances.

KEY WORDS: BIM, catalog, components, architecture, modularity, performance evaluation.

1. Introduction

Notre étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche (SPW Plan Marshall 2011-2016), dont le but est de définir un système constructif industrialisé modulaire, intégrant des technologies et des composants innovants au service du développement durable.

Le processus de création, de visualisation et d'évaluation des performances d'un bâtiment modulaire préfabriqué s'appuie sur une maquette numérique. Ce processus type BIM (Building Information Modeling) révolutionne aujourd'hui la façon dont les bâtiments sont planifiés, conçus, créés et gérés [HOL 06]. Cette technologie permet d'atteindre plus aisément les objectifs d'un projet en terme de performance et de productivité [EAS 11]. Comment créer un *Building Information Modeler* spécifique, intégrant l'information nécessaire et suffisante, liée aux différents composants d'un bâtiment modulaire préfabriqué ? Comment supporter un tel principe constructif ? L'information géométrique et sémantique des composants pourra-t-elle être exploitée afin d'être utile pour le concepteur de ce type de bâtiment ?

2. Le contexte: modularité et préfabrication des bâtiments

La conception d'un *modeler* de support pour un bâtiment modulaire préfabriqué a suscité deux interrogations initiales : Qu'est-ce qu'une architecture modulaire préfabriquée et quelles informations ce modeler doit-il supporter ?

« La modularité est une approche de conception visant la production de masse de produits sur mesure. Elle peut permettre d'atteindre des niches de marché avec des produits fortement différenciés, livrés à moindre coût et en un plus court temps sans consommer excessivement de ressources » [LAP 04]. Ainsi, telle que précisée par divers auteurs, la modularité est constitutive d'une nouvelle architecture du produit. Elle comprend la manière dont les composants d'un système sont agencés et elle contraint à repenser la forme organisationnelle efficace pour assurer la conception, la production et la commercialisation du produit final [BAL 00].

Dans son article sur la modularité, V. Frignant [FRI 04] précise que l'architecture modulaire s'avère donc un puissant simplificateur de la complexité des systèmes, en offrant une décomposition en sous-systèmes autonomes, au sens où il est possible de les développer et de les pré-assembler séparément. Le lien entre ces sous-systèmes s'effectue par des interfaces relativement stables. Le découplage des interfaces autorise alors une évolution des sous-systèmes, désormais qualifiés de modules, sans induire une modification des autres modules, ni la redéfinition du produit dans sa globalité.

En plus de l'aspect modulaire du système constructif considéré, ce dernier est également préfabriqué et il répond à la problématique générale des performances des bâtiments (thermique, acoustique, économique, etc.). D'après Resendiz-Vazque, la conception préfabriquée englobe plusieurs paramètres de natures très différentes : le lieu de fabrication, les moyens de réalisation et la vitesse que la préfabrication peut permettre. Le caractère « industriel » est intrinsèque aux moyens de production. Un objet industriel est fabriqué selon des méthodes de ce que l'on a défini par industrie, au milieu du XXème siècle: série, standardisation, rationalisation, mécanisation, contrôle (qualité, quantité, temps de production), continuité de production. Ces paramètres ont été plus ou moins référencés par différents acteurs et auteurs de la préfabrication (Bernard Lafaille, Eugène Freyssinet, Jean Prouvé, Henri Sauvage). Par exemple, Bernard Lafaille, cité par Resendiz-Vazque formule : « Je définis la préfabrication comme une méthode de construction par assemblage d'éléments identiques, fabriqués d'avance par longues séries, avec des moyens mécaniques. Le mode d'assemblage doit être rapide et exiger peu de main-d'œuvre, ce qui exclut par exemple, nos murs de briques » [RES 10].

Pour atteindre les performances attendues d'un bâtiment, il est aujourd'hui impératif de se tourner vers des systèmes constructifs qui peuvent les garantir; d'une part, par une conception maîtrisée du bâtiment avec des études d'ingénierie multidisciplinaires à la phase de conception, et d'autre part, en considérant une mise en œuvre bien maîtrisée. Comme le précise bien J. Carassus [CAR 07] dans ses « Trois modèles de maîtrise de l'énergie dans les bâtiments », la conception du bâtiment doit être considérée comme un ensemble, enveloppe et équipements, ce qui demande de nouvelles relations entre architectes et bureau d'études thermiques. Selon ce même auteur, l'ingénierie par phases successives, qui se définit par l'enveloppe imaginée par l'architecte, puis les équipements conçus par le bureau d'études thermiques, doit laisser place à une ingénierie concourante, chaque partie de la maîtrise d'œuvre contribuant simultanément à la conception architecturale, technique et économique des bâtiments. La performance étant directement dépendante de la qualité de la mise en œuvre, en particulier pour l'étanchéité à l'air du bâtiment, la relation entre conception et mise en œuvre sur chantier est plus étroite. Les rapports entre production et gestion des bâtiments doivent être réexaminés, pour que les

performances potentiellement définies pendant les phases de conception et d'exécution soient réelles aux stades de la gestion et de l'exploitation du bâtiment.

Comme défini également dans le Guide de la Performance Énergétique des Bâtiments [PEB 15], le but de la performance énergétique des bâtiments est de réduire la consommation d'énergie primaire des bâtiments, avec trois priorités à promouvoir pour concevoir un bâtiment énergétiquement performant : la qualité de l'enveloppe du bâtiment, les qualités des systèmes techniques spéciales et la qualité des énergies. Comme indiqué dans le guide pratique de la construction [IBG 10], plus que la performance des matériaux, c'est la qualité de mise en œuvre de ceux-ci qui détermine la qualité des performances acoustiques dans un bâtiment. Enfin, concernant la performance économique, les stratégies de préfabrication et l'automatisation de la conception augmentent considérablement la productivité dans l'industrie de la construction. Ainsi, la conception de système préfabriqué se transforme en un processus de configuration supporté par de l'ingénierie, avec une base des connaissances appliquées directement au produit final [KUN 10]. En effet, ces systèmes conçus et construits en chaîne de fabrication, avec une approche modulaire, présentent certains avantages. Ils permettent une économie d'échelle, liée à un certain niveau de standardisation des modules, tant d'un point de vue fabrication que de celui des études techniques. De plus, il vise à favoriser une économie de temps permettant de fabriquer le bâtiment en atelier, et de le monter de façon contrôlée sur site, le tout par l'assemblage efficace de composants architectoniques et techniques innovants et performants [BOU 16].

P. Willem [WIL 13] expose les avantages de la préfabrication en atelier de systèmes constructifs modulaires. Premièrement, elle assure un meilleur processus de construction, avec une fabrication, voire même un assemblage, dans un environnement protégé à l'abri des intempéries, des vols et des regards, en évitant que le système soit assujéti aux aléas du chantier, ainsi qu'une meilleure disponibilité des équipements sur place et une forte réduction des déplacements et de leur logistique. Deuxièmement elle garantit un meilleur produit, vu le travail effectué dans un environnement propice à la précision, avec une meilleure maîtrise de la qualité du produit, des facteurs d'erreurs, d'accident, de maladie et une gestion améliorée de l'humidité. Troisièmement, elle offre une meilleure gestion du temps par la possibilité d'une fabrication de plusieurs composants ou modules en même temps que la préparation du chantier, sans délai dû aux conditions météorologiques, par un montage sur chantier et une livraison rapide de quelques heures à quelques jours. Quatrièmement, elle apporte une meilleure gestion des déchets en limitant les chutes, voir parfois un recyclage possible des matériaux, ce qui assure également des chantiers plus propres. Cinquièmement, elle favorise une meilleure gestion financière, avec un personnel plus productif, dans des meilleures conditions de travail, avec un espace de travail conçu convenablement, ce qui entraîne une meilleure rentabilité.

En particulier, dans le cas du système modulaire étudié, d'autres avantages viennent se rajouter à la liste précédente. En effet, D.Dethier [DET 11] précise que grâce à leur comptabilité et leurs dimensions standardisées, les composants facilitent l'utilisation de recherches et d'innovations technologiques dans plusieurs domaines, comme les technologies « autonomes », telles que les systèmes de chauffage et de rafraîchissement, la domotique, les réseaux électriques basse tension, la gestion de l'inertie thermique, etc., et/ou les technologies « intégrées » aux composants, concernant l'isolation, les revêtements de surface, le vitrage, etc., encore/ou les technologies d'assemblage, de transport et de montage sur chantier dans des délais courts.

3. La méthodologie: virtualisation de l'architecture modulaire, l'approche « par composants »

Dans son article fondateur sur la modularité, K. Ulrich [ULR 95] évoque la notion d'« architecture produit » qui se définit comme la manière dont sont agencés les éléments fonctionnels et les composants physiques formant un système global (le produit). Nous nous sommes basés sur cette notion pour l'étude de notre système modulaire. Le but de notre approche, dite « par composants » consiste d'abord, à identifier comment les différents éléments fonctionnels du système complexe sont agencés et comment cet agencement détermine la performance globale du produit. Ensuite, il s'agit d'étudier le passage des éléments fonctionnels aux composants physiques qui sont intégrés dans le système constructif et de savoir si une fonction est remplie par un seul ou plusieurs composants physiques. Enfin, il convient d'analyser les liens des composants physiques du système entre eux et avec le système global, en s'interrogeant sur les interfaces qui commandent les interactions physiques entre les composants, et si une modification d'un composant implique ou pas une modification subséquente chez les composants reliés.

Dans notre approche, la définition des « composants physiques » se base comme dans l'étude sur l'évolution de l'industrialisation de P. Chemillier [CHE 77] sur les trois niveaux de préfabriqués : a) le composant : « [...] est un produit fini qui a suivi une mise en forme telle qu'il peut être intégré directement dans la construction des ouvrages, sans pouvoir toutefois remplir à lui seul une fonction de la construction [par exemple, les prédalles] » ;

b) le sous-ensemble : « [...] assure à lui seul au moins une fonction technique de la construction [par exemple, les panneaux de façade] », c) le module : « [...] représente un 'morceau' du bâtiment ».

Après examen approfondi du système modulaire, divers documents de base sont établis: un listing des certitudes et des incertitudes du système constructif en repérant les composants physiques répétitifs à dimensions standardisées et non variables, des schémas explicatifs d'arborescence de tous les composants physiques du système afin de faciliter sa compréhension, un listing de tous les composants physiques qui forment la structure, les attributs de ces derniers et leurs interconnexions, ainsi qu'une représentation 3D du système afin d'étudier les interactions géométriques entre les composants physiques. Cette approche concrétise le passage de tous les composants physiques du système constructif modulaire vers des composants logiciels.

La méthodologie abordée pour cette approche comprend plusieurs phases: d'abord, l'identification de chaque composant du système modulaire. Ensuite, l'examen de l'importance et de la fonction attribuée à chaque composant dans le système par rapport à un utilisateur du *Building Information Modeler*. Certains composants semblent primordiaux, directement liés à l'intervention de l'utilisateur du logiciel, alors que d'autres semblent répétitifs et l'intervention de l'utilisateur n'est pas souhaitée. Enfin, la synthétisation et la création des composants logiciels, suffisants pour intégrer tous les composants physiques du système et en conséquence les divers catalogues de composants. Ainsi, les composants logiciels sont définis de la sorte: (1) par la variabilité de leurs paramètres, (2) par l'intervention de l'utilisateur et son interaction avec le *modeler* et la manière dont les différents paramètres de ces composants sont définis par l'utilisateur, (3) par l'implication du choix de l'utilisateur, qui définit de façon sous-jacente toutes les règles et le comportement que doit avoir le *modeler* en réponse aux choix de l'utilisateur et (4) par les sorties du *modeler*, pour chaque composant, à savoir ce que l'utilisateur pourra obtenir en termes de documents (plans, métrés, fiches techniques, etc.). Cette approche dite « par composants », nous a ainsi conduit à définir des catalogues de composants logiciels. Dans la partie qui suit, nous exposons comment ce catalogue a constitué la base de la structuration de l'architecture logicielle du *Building Information Modeler*.

4. Le modèle: représentation du système constructif pour le logiciel de modélisation

Le *modeler* développé doit remplir plusieurs objectifs. Il doit répondre aux différents besoins de modélisation tout au long de la conception du projet d'architecture (prototypage rapide et intuitif par le client lui-même ou modélisation détaillée par un architecte). Le logiciel doit également proposer différents évaluateurs de performances comme, par exemple, l'ensoleillement, la thermique ou l'acoustique. Aussi, le logiciel doit fournir toutes les sorties nécessaires à la bonne exécution du projet de construction : métrés, sortie CAD ou plans d'exécution. Enfin, le logiciel doit permettre l'extension du système constructif par de nouveaux composants et permettre l'ajout aisé de nouveaux évaluateurs ou de nouvelles sorties.

Pour répondre à ces objectifs, la stratégie adoptée est de représenter le système constructif au travers d'un catalogue de composants, qui n'est pas dépendant du code du logiciel et qui peut être modifié par les architectes du projet sans l'aide d'informaticiens. Deux questions se posent alors pour implémenter cette stratégie : quelles sont les informations qui doivent être reprises dans ce catalogue et comment ces informations vont-elles être représentées pour établir le pont entre les compétences « métiers » (architecturales) et les contraintes techniques informatiques.

Le système constructif comprend de nombreux éléments différents, comme des modules de structures, des panneaux de façades, des types de murs et portes intérieures, des revêtements, etc. Ces éléments possèdent une description très détaillée afin d'en permettre la fabrication. Ainsi, par exemple, le détail des fixations pour les panneaux de façades doit être parfaitement décrit dans le système constructif. Mais ce niveau de détail doit-il faire partie du catalogue logiciel ? Si on veut faire apparaître ces fixations dans la sortie CAD du logiciel, ils doivent bien être présents sous cette forme. Par contre, le concepteur qui utilise l'interface du logiciel n'a aucune marge de manœuvre sur le type ou l'emplacement de ces fixations. Dans le niveau d'abstraction voulu pour cette activité de modélisation, ces détails deviennent donc « inutiles » voire encombrants. On distinguera ainsi deux types d'éléments pour le logiciel : les éléments « actifs », sur lesquels des choix de conception peuvent s'opérer et les éléments « passifs », très nombreux, qui sont automatiquement déterminés par des décisions de conceptions plus macroscopiques. Le catalogue doit connaître de façon sémantique les éléments actifs, afin que le logiciel puisse dialoguer avec l'utilisateur selon le niveau d'abstraction adéquat. Ces éléments actifs constituent le vocabulaire commun entre le logiciel et l'utilisateur. Ils sont, pour le logiciel, les « composants » du catalogue (que nous distinguons ici de la notion de composants physiques du système constructif lui-même qui est un concept différent).

Pour répondre aux besoins du logiciel, chacun de ces composants peut recevoir de nombreuses représentations, comme l'illustre la figure 1. Un composant « panneaux de façade » doit posséder une représentation en 'vignette' de façon à pouvoir afficher à l'utilisateur une liste visuelle des différentes façades disponibles. Il doit aussi proposer un modèle 3D OBJ qui représente le panneau de façade dans la scène 3D au sein de laquelle l'utilisateur visualise son bâtiment. Une représentation CAD doit aussi être fournie, pour permettre l'exportation vers les outils logiciels de production. Cette notion de représentation multiple est directement inspirée du format IFC qui permet la représentation d'un même élément sous différents niveaux d'abstraction [IFC 07]. Elle offre un mécanisme d'extensibilité utile au logiciel : lorsqu'un nouveau type de sortie est demandé, il viendra naturellement s'encoder sous une nouvelle représentation à fournir pour chaque composant concerné. Enfin, elle permet d'encoder facilement la représentation des éléments passifs : si un détail complémentaire est désiré dans la sortie CAD, il suffit de l'ajouter dans la représentation désirée, sans que le logiciel n'en soit modifié. C'est à la discrétion du concepteur du catalogue de choisir la présence ou non de tel détail dans la vue 3D d'édition, en le plaçant ou non dans la représentation correspondante, selon le niveau d'abstraction qui lui semble adéquat.

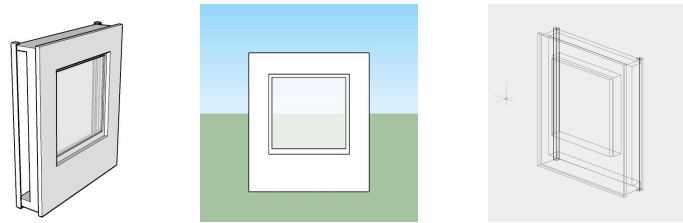


Figure 1 : diverses représentations d'un composant du catalogue (3D OBJ, 'vignette', géométrie DXF).

La figure 2 montre un diagramme de classe UML [MIL 06] des données du catalogue. Les représentations sont constituées de fichiers externes donnant les images, les modèles 3D ou les blocks CAD des composants. Un index global est aussi nécessaire pour relier les composants aux informations sémantiques nécessaires (comme les prix, les dimensions ou toute valeur utile à un évaluateur) et aux fichiers de représentation. Initialement, cet index était décrit en format xml, lisible par un humain. Mais, pour en assurer une édition aisée, cet index a été converti en format csv, éditable dans une feuille de tableur classique (Excel), qui, dans ses différents onglets, reprend sous forme de tables les nombreux composants et leurs propriétés. Ce nouvel encodage s'est avéré beaucoup plus commode pour la création et l'édition de catalogues par des non-informaticiens.

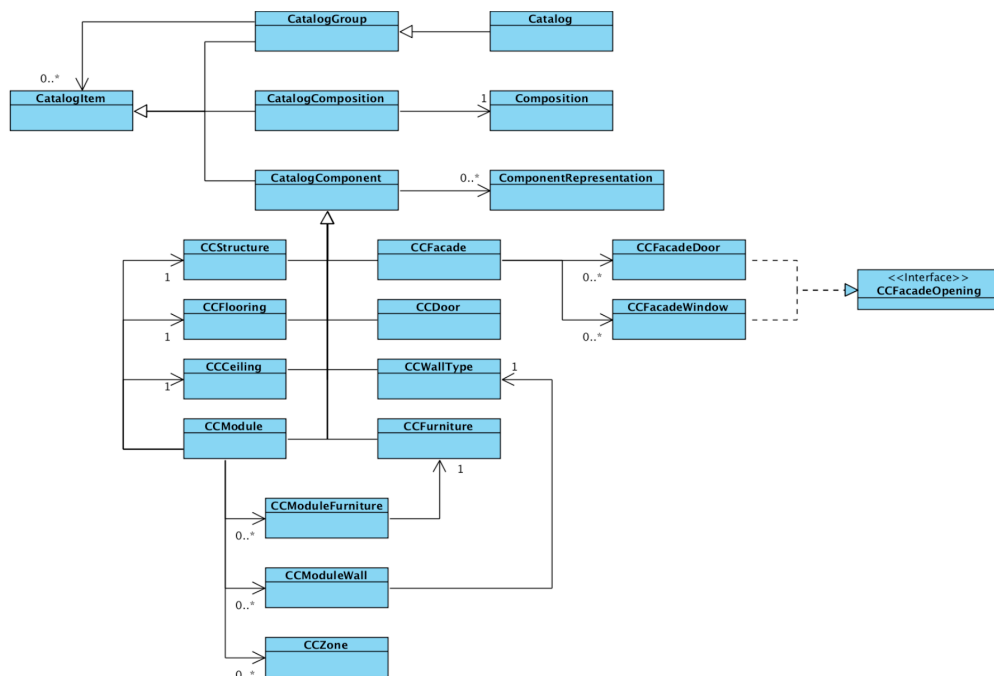


Figure 2 : diagramme de classe UML des données du catalogue.

5. Les sorties: exploitation des informations géométriques et sémantiques des composants

5.1. Evaluation « énergie passive »

Dans le cadre de ce projet, le partenaire Architecture et Climat de l'UCL (Université Catholique de Louvain) a implémenté, dans le logiciel EES (Engineering Equation Solver), un calcul complexe pour l'évaluation des besoins en énergie [MAS 15]. D'importantes quantités de données sont encodées pour mener à bien ce calcul : volumes des espaces, surfaces (de plancher, de plafond, de façades, brutes ou nettes, en contact ou non avec l'extérieur ou avec des zones chauffées, dimensions des portes et fenêtres, etc.). Notre *modeler* peut formater et exporter automatiquement ces données, qui seront récupérées dans l'évaluateur EES.

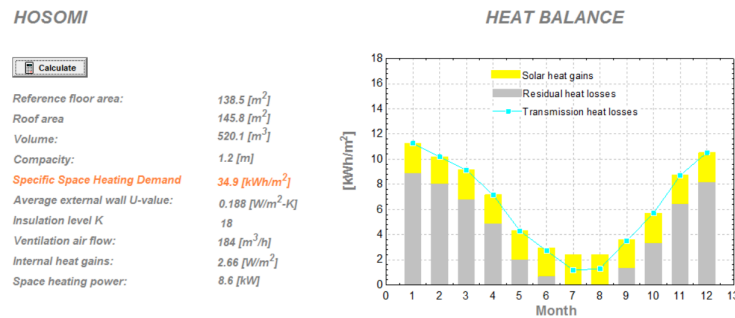


Figure 4 : calculs thermiques du bâtiment.

5.2. Evaluation du potentiel d'ensoleillement

L'UCL a également fourni un algorithme permettant le calcul d'ensoleillement naturel intérieur des locaux. Celui-ci a été intégré par nos soins au *modeler* afin de permettre la visualisation de l'ensoleillement au sein même du modèle 3D.

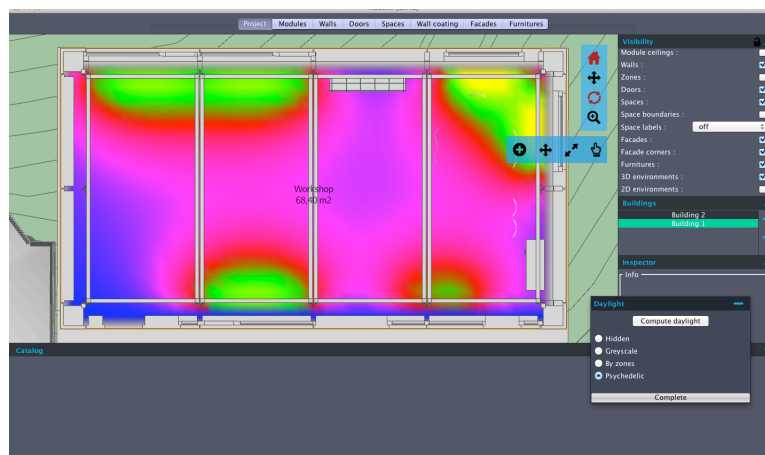


Figure 5 : représentation du résultat du calcul d'ensoleillement naturel.

5.3. Module d'export CAD

La sortie la plus attendue par le maître d'œuvre est une sortie au format DXF. Grâce au principe du catalogue pointant vers une ressource DXF pour chaque composant concerné, le *modeler* peut exporter un projet complet en DXF, avec un niveau de détail arbitrairement choisi par le concepteur du catalogue.

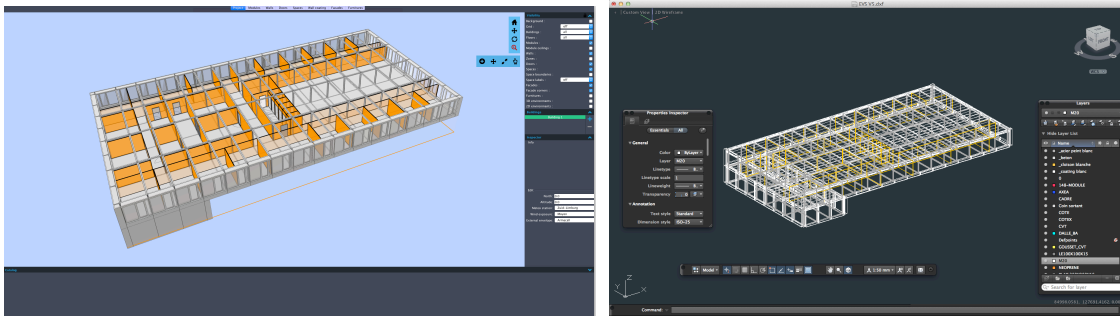


Figure 6 : modules exportés (modèle 3D produit) et récupérés dans AutoCAD.

5.4. Métré et estimatifs

En disposant des prix des composants dans le catalogue et en calculant les surfaces délimitées par les différentes frontières, le logiciel peut, à tout moment bien sûr, produire un métré détaillé d'un projet, intégrant les règles de mesurage usuelles en la matière.

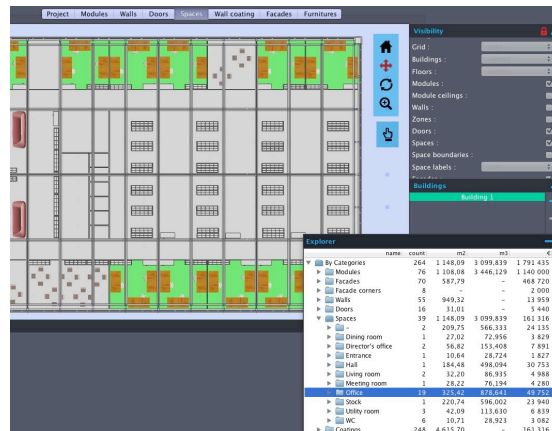


Figure 7 : métré détaillé dans le logiciel.

6. Limites et perspectives

L'approche « par catalogue de composants » a permis le développement d'un *modeler* dédié à une architecture modulaire. Ce catalogue a été pensé pour être extensible. Les différents tests effectués dans ce sens se sont montrés probants: des architectes non spécialisés ont pu étendre ce catalogue sans l'aide d'informaticiens.

Une architecture modulaire limite évidemment les possibilités de faire librement du sur-mesure. Cependant, il est difficile pour les architectes de renoncer à ce genre de liberté. Le choix qui est retenu est donc le suivant : le logiciel se concentre uniquement sur les aspects autorisés par le système constructif, puis, grâce à l'export CAD, le projet peut être adapté de façon plus libre dans un logiciel de production architecturale classique. Néanmoins, après cette étape, il n'est évidemment plus possible de revenir dans notre *modeler* pour modifier le projet. Certaines dimensions sont actuellement maintenues dans le code logiciel, comme par exemple l'écart entre un panneau de façade et les éléments de structures. Il serait possible de les déplacer dans le catalogue et d'étendre ainsi la généralité de celui-ci. Aussi, le logiciel présente le catalogue sous une forme adaptée au nombre actuel de composants disponibles. Si ce nombre devait grandement augmenter, il serait nécessaire de changer la façon dont les composants sont présentés et sélectionnés, conduisant à ajouter au catalogue des informations complémentaires, comme, par exemple, des mots-clés ou des arborescences thématiques de présentation.

7. Remerciements

Ce projet est financé par la Région Wallonne dans le cadre de la convention N°6719 relative à un partenariat d'innovation technologique mis en œuvre par le pôle de compétitivité MECATECH.

8. Bibliographie

- [BAL 00] Baldwin C.Y., Clark K.B., « Design Rules : The Power of Modularity », Cambridge, MA, *MIT Press*, 2000.
- [BOU 16] Boulanger C., Rahhal A., Delfosse V., Lorquet C., Leclercq P., « Functional specification methodology for an architectural modeler supporting a modular constructive system », *DESIGN 2016*, 2016.
- [CAR 07] Carassus J., « Trois modèles de maîtrise de l'énergie dans les bâtiments », *Les Annales de la recherche urbaine*, 2007.
- [CHE 77] Chemillier P., *Les Techniques du bâtiment et leur avenir: nouvelles données du marché, évolution de l'industrialisation*, Paris, Éditions du "Moniteur", 1977.
- [DET 11] Dethier Architecture, *Présentation générale HOSOMI*, 2011.
- [EAS 11] Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K., « *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* », chapitre 7, 2011.
- [FRI 04] Frigant V., « La modularité : un fondement pour les firmes architectes ? », *Cahiers du GRES*, Université Montesquieu Bordeaux IV & Université des Sciences Sociales Toulouse 1, n°2004-2, 2004.
- [HOL 06] Holness G.V.R., « Building Information Modeling », *ASHRAE Journal*, vol. 48, n°8, p. 38-40, p. 42, p. 44-46, 2006.
- [IBG 10] Institut Bruxellois Pour la Gestion de l'Environnement Bruxelles Environnement, *GUIDE PRATIQUE POUR LA CONSTRUCTION ET LA RENOVATION DURABLE DE PETITS BATIMENTS - RECOMMANDATION PRATIQUE MAT11*, 2010.
- [IFC 07] BuildingSmart, *IFC2x Edition 3*, <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/index.htm>, 2007
- [KUN 09] Kunz J., Fischer M., « *Virtual Design and Construction: Themes, Case Studies and Implementation* », Stanford University, 2009.
- [LAP 04] Lapointe M., Beauregard R. et D'Amours S., *Système standardisé pour la production de maisons usinées: Phase 3- Analyse des contraintes de conception des maisons usinées et de leurs composantes*, Rapport V2W-UL5-2004-03, Université Laval, Québec, 2004.
- [LUC 14] LUCID-ULg, *Rapport d'activité 2*, Université de Liège, 2014.
- [LUC 15] LUCID-ULg, *Rapport d'activité 5*, Université de Liège, 2015.
- [MAS 15] Masy G., *Rapport d'activité du 1 avril au 30 septembre et Rapport d'activité du 30 septembre au 15 novembre*, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain, 2015
- [MIL 06] Miles R., Hamilton K., *Learning UML 2.0 - A Pragmatic Introduction to UML*, O'Reilly Media, 2006.
- [PEB 15] Direction des Bâtiments durables du Service public de Wallonie et le partenariat Confluence-Construction, *Guide de la Performance Energétique des Bâtiments (PEB)*, 2015.
- [RES 10] RESENDIZ-VAZQUE A., *L'industrialisation du bâtiment Le cas de la préfabrication dans la construction scolaire en France (1951-1973)*, Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers - Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement, Paris, 2010.
- [ULR 95] Ulrich K., « The role of product architecture in the manufacturing firm », *Research Policy*, n°24, p.419-440, 1995.
- [WIL 13] Willem P., *FORMATION BATIMENT DURABLE: MATERIAUX ET DECHETS DE CONSTRUCTION : Modularité, préfabrication et flexibilité*, *Institut Bruxellois Pour la Gestion de l'Environnement*, 2013.