



Un environnement méthodologique et logiciel pour l'interopérabilité de la maquette numérique du bâtiment et de la simulation énergétique : application à la réglementation thermique RT2012

Emira El Asmi

► To cite this version:

Emira El Asmi. Un environnement méthodologique et logiciel pour l'interopérabilité de la maquette numérique du bâtiment et de la simulation énergétique : application à la réglementation thermique RT2012. Modélisation et simulation. Université Paris VIII, 2016. Français. NNT : 2016PA080051 . tel-02273247

HAL Id: tel-02273247

<https://hal.science/tel-02273247>

Submitted on 28 Aug 2019

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.

Un environnement méthodologique et logiciel pour l'interopérabilité de la maquette numérique du bâtiment et de la simulation énergétique : application à la réglementation thermique RT2012

Emira El Asmi

► To cite this version:

Emira El Asmi. Un environnement méthodologique et logiciel pour l'interopérabilité de la maquette numérique du bâtiment et de la simulation énergétique : application à la réglementation thermique RT2012. Modélisation et simulation. Université Paris VIII, 2016. Français. NNT : 2016PA080051 . tel-02273247

HAL Id: tel-02273247

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-02273247>

Submitted on 28 Aug 2019

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.



THÈSE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS VIII

Spécialité : Informatique

Présentée par

Emira EL ASMI

Un environnement méthodologique et logiciel pour
l'interopérabilité de la maquette numérique du
bâtiment et de la simulation énergétique
Application à la réglementation thermique RT2012

Thèse dirigée par **Khaldoun ZREIK**

encadrée par **Sylvain Robert**

préparée 2016 au sein du **Laboratoire d'Analyse des Données et
d'Intelligence des Systèmes du CEA LIST**

et du **Laboratoire Paragraphe de l'Université Paris 8**
dans l'**École doctorale Cognition, langage, interaction**

soutenue le 13 avril 2016

Résumé

L'analyse de la performance énergétique des bâtiments neufs repose massivement sur des outils logiciels de simulation. La valeur ajoutée de ces derniers est indéniable : ils permettent d'optimiser la conception en facilitant l'évaluation des performances énergétiques du bâtiment durant la phase de conception. Leur impact est cependant limité par plusieurs obstacles, dont les principaux sont le niveau d'expertise requis pour leur utilisation et l'absence de connexion aux outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ce dernier point devient particulièrement critique au moment où l'utilisation de la maquette numérique BIM (Building Information Model) se généralise et où les modèles issus d'outils de CAO sont de plus en plus riches.

Cette thèse repose sur cette observation et propose, afin de profiter pleinement du potentiel du BIM et des outils en lien, de contribuer à l'émergence d'approches permettant une transformation fiable et transparente des informations du bâtiment numérique BIM vers les fichiers d'entrée des environnements de simulation. Cela se traduirait par des avantages significatifs, tant sur le rapport coût-efficacité (l'analyse est effectuée plus efficacement), qu'au niveau de la fiabilité (les modèles de simulation sont conformes aux modèles de conception). Toutefois, pour mettre en œuvre de telles approches, plusieurs obstacles doivent être pris en compte : le premier est la nécessité de disposer d'un langage normalisé commun pour le BIM, le deuxième est la définition de mécanismes méthodologiques efficaces et normalisés afin d'enrichir le BIM pour la simulation, le troisième est la mise à disposition d'outils logiciels fiables pour la transformation automatisée du BIM vers les modèles de simulation thermique.

Le premier obstacle est en passe d'être levé grâce aux standards issus du consortium international buildingSMART, en particulier les « Industry Foundation Classes » (IFC) qui sont désormais largement reconnus comme un format d'échange standard du BIM dans le domaine de la construction. Le deuxième verrou reste actuel : l'IFC, même dans sa dernière version IFC4, laisse entier de nombreux problèmes de formulation de concepts propres aux domaines métiers, en particulier celui de la simulation énergétique. Cependant, des environnements méthodologiques ont vu le jour permettant d'étendre et d'enrichir de façon structurée les formats de données BIM. C'est par exemple le cas de l'IDM (Information Delivery Manual) et du MVD (Model View Définition) de buildingSMART, pour les IFC.

L'objectif de nos travaux est triple. En premier lieu, il s'agit de mettre en œuvre et évaluer l'environnement IDM/ MVD de buildingSMART pour l'interconnexion entre le BIM (format IFC) et la simulation énergétique. Cette étude nous a amenés à proposer un modèle pivot (BSM pour « Building Simulation Model ») basé sur une analogie avec les approches prônées par l'ingénierie dirigée par les modèles. Nous avons également développé un outil logiciel, qui inclut une base de règles de *mapping*, afin d'automatiser la traduction de l'information entre le modèle IFC et le modèle de simulation. Cette approche a été évaluée sur la base de l'outil COMETH (moteur de simulation de la régulation thermique française RT2012) mais elle est généralisable.

Mots clés: Bâtiment, BIM, IFC, IDM, MVD, Conception, Simulation thermique, Génie logiciel.

Abstract

Energy performance analysis of new buildings strongly relies on simulation tools. They optimize the design by facilitating building performance analysis during the design phase. However, there are several limitations, among which one of the main is the lack of reliable connections between Computer Aided Design (CAD) and simulation tools. This is particularly critical at a time when the concept of Building Information Model (BIM) is widely applied and the CAD models are becoming richer.

This thesis proposes to take advantage of the potential of BIM in order to contribute to emerging approaches for a reliable and seamless interconnection between building information models and simulation environment input files. This would result into significant benefits, both from the cost-effectiveness (analysis is performed more effectively) and the reliability (simulation models strictly comply with design models) points of view. However, to implement such approaches, several barriers have to be considered. The first is the need for a common, standardized BIM language. The second is the definition of adequate and standardized extension mechanisms, to customize BIM for simulation-specific purposes. The third is the provision of software tools, for effective and reliable BIM to simulation models transformation.

The first barrier is likely to be overcome through the advent of the buildingSMART Industry Foundation Classes (IFC), which is widely recognized as a standard BIM exchange format in the construction industry. However, with respect to the second barrier, the IFC remains a wide-purpose modelling language and as such, fails to address many domain-specific issues, like e.g. energy simulation. This limitation has been acknowledged by buildingSMART, who have delivered novel methodological tools to allow for domain-specific customization of IFC. The main one is called the Information Delivery Manual (IDM).

The aim of our work is the implementation and evaluation the BuildingSMART framework IDM/MVD to interconnect BIM (IFC) and energy simulation. This study led us to propose a pivotal model (BSM for « Building Simulation Model») based on an analogy with model driven engineering approaches. We also have developed a software prototype, which includes a set of mapping rules that automates the translation process between the IFC model and the simulation tool. In the scope of this study, we targeted the COMETH simulation tool (a simulation engine based on the French thermal regulation RT2012) but our results can easily be extended to additional tools.

Key words: Building, BIM, IFC, IDM, MVD, Design, Thermal simulation, Software Engineering.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
Acronymes	vi
Chapitre 1 Contexte et objectifs de la thèse	1
I. Rôle de la simulation énergétique dans le bâtiment	2
I.1. Le cycle de vie du bâtiment	2
I.2. Outils pour la simulation énergétique du bâtiment	4
I.3. Notre enjeu : faciliter et fiabiliser l'utilisation des outils de simulation énergétique pendant la conception	7
II. Building Information Model (BIM)	8
II.1. Caractéristiques générales du BIM	8
II.2. Vers un cycle de vie collaboratif basé sur le BIM	10
III. Motivations	12
III.1. Problématique	12
III.2. Objectifs de la thèse	13
III.3. Contributions de la thèse	14
Chapitre 2 Building Information Model pour l'interopérabilité en conception	17
I. Etat de l'art sur les formats et standards du BIM	18
I.1. Les formats et standards ouverts dans le BIM	19
I.2. Les formats propriétaires	21
I.3. Synthèse sur les modèles et formats de données et analyse des limites	22
II. Approches d'extension et d'enrichissement du BIM IFC	24
II.1. Les mécanismes d'extension du modèle IFC	24
II.1.1. Mise à jour du méta-modèle du standard IFC	24
II.1.2. Extensions à l'aide des mécanismes natifs de l'IFC	25
II.2. Enrichissement sémantique du standard IFC	26
II.2.1. Enrichissement à l'aide de l'IFD (International Framework for Dictionaries)	26
II.2.2. Enrichissement sémantique de l'IFC à l'aide d'ontologies	27
II.3. Synthèse et définition de nos orientations de recherche	29

III. Outils pour la spécification des processus de transmission et de transformation de l'information de conception	32
III.1. Information Delivery Manual (IDM)	33
III.2. Model View Definition (MVD)	33
Conclusion	34
Chapitre 3 Environnement méthodologique pour l'interopérabilité du BIM : application à la simulation énergétique	35
I. BIM pour la simulation énergétique : état de l'art et limites	37
I.1. Connecter le BIM et la simulation énergétique du bâtiment : une question complexe	37
I.2. IFC et gbXML, des formats d'échanges pour la simulation	39
I.3. Utilisation du BIM pour la simulation : état de l'art	40
I.4. Discussion et orientation	43
II. Application de la méthodologie IDM et construction d'un MVD pour la simulation énergétique	45
II.1. Applications de l'IDM dans la conception numérique du bâtiment	45
II.2. Application de l'IDM à la modélisation de la connexion IFC-COMETH	46
II.2.1. Définition du processus	47
II.2.2. Etablissement de la Process map	47
II.2.3. Définition des « Exchange Requirement »	50
II.2.4. Etablissement du tableau des Exchanges Requirements	51
II.3. Mapping vers l'IFC, Etablissement de la MVD	52
Conclusion	54
Chapitre 4 Le Building Simulation Model : une approche inspirée par l'ingénierie dirigée par les modèles	57
I. Un modèle neutre, en accord avec les principes de l'ingénierie dirigée par les modèles	58
I.1. La nécessité d'un modèle neutre	58
I.2. L'interopérabilité dans l'ingénierie dirigée par les modèles	60
I.3. Model-Driven Architecture (MDA)	60
II. Le Building Simulation Model comme modèle neutre en conception numérique	63
II.1. Points communs entre le BSM et le PIM	63
II.2. Le Building simulation Model	65
II.2.1. Indépendance et généricité	65
II.2.2. Architecture du BSM	66
II.2.3. Le BSM, un modèle extensible	68

Conclusion	69
------------------	----

Chapitre 5 Développement de la plateforme logicielle de traduction BIM

IFC – Simulation thermique 71

I. Fonctionnalités du logiciel et exigences	72
I.1. Le processus à mettre en œuvre	72
I.2. En amont du processus de transformation : la création du BIM	74
I.3. Note sur le choix du langage de développement	74
I.4. Note sur les diagrammes de classe UML2	75
I.5. La version IFC utilisée dans le prototype	75
I.6. Description du cas d'application	75
II. Caractéristiques du logiciel – Eléments de conception	76
II.1. Implémentation du BSM	77
II.2. Module de traduction IFC vers BSM	78
II.3. Implémentation du modèle de données COMETH	79
II.4. Implémentation de la traduction BSM vers COMETH	82
II.4.1. Mapping direct	82
II.4.2. Mapping par calcul	83
II.4.3. Ajout de données externes	83
II.4.4. Résumé sur les règles de correspondances	83
II.5. Résultats des tests	84
Conclusion	85

Chapitre 6 Conclusions et perspectives 87

I. Synthèse des contributions	89
II. Discussion	91
III. Perspectives	92

Références bibliographiques 95

Annexe I Introduction à la méthode de calcul RT 2012	107
Annexe II L'Information Delivery Manual développé pour notre application.....	111

Acronymes

AEC	Architecture Engineering and Construction
BIM	Building Information Model
BSM	Building Simulation Model
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CIM	Computation Independent Model
COMETH	COre for MOdelling Energy and THERmal Comfort
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CVC	Chauffage, Ventilation, Climatisation
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
IAI	International Alliance for Interoperability
IDF	Intermediate Data Format
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
IFD	International Framework for Dictionaries
MDA	Model Driven Architecture
MDE	Model Driven Engineering
MVD	Model View Definition
OWL	Ontology Web Language
PIM	Platform Independent Model
PSM	Platform Specific Model
RDF	Ressource Description Framework
SIG	Système d'Information Géographique
SPARQL	Protocol and RDF Query Language
STD	Simulation Thermique Dynamique
TIC	Technologie de l'Information et de la Communication
UML	Unified Modeling Language
XML	eXtensible Markup Language

Chapitre 1 Contexte et objectifs de la thèse

Sommaire

I. Le rôle de la simulation énergétique dans le bâtiment	2
I.1. Le cycle de vie du bâtiment	2
I.2. Outils pour la simulation énergétique du bâtiment	4
I.3. Notre enjeu : faciliter et fiabiliser l'utilisation des outils de simulation énergétique pendant la conception	7
II. Building Information Model (BIM)	8
II.1. Caractéristiques générales du BIM	8
II.2. Vers un cycle de vie collaboratif basé sur le BIM	10
III. Motivations	12
III.1. Problématique	12
III.2. Objectifs de la thèse	13
III.3. Contributions de la thèse	14

I. Rôle de la simulation énergétique dans le bâtiment

Dans cette section, nous donnons dans un premier temps une rapide description du cycle de vie du bâtiment, afin de situer la phase de conception, qui est celle que nous ciblons dans ce travail. Ensuite, nous décrivons les principales caractéristiques des outils de simulation visés. Enfin, nous décrivons l'enjeu dans lequel nous nous positionnons.

I.1. Le cycle de vie du bâtiment

Le cycle de vie d'un produit est l'ensemble des phases (figure 1) qui sont nécessaires à sa création et à son utilisation, depuis les phases très amonts (conceptualisation) jusqu'aux phases liées à sa fin de vie (destruction, recyclage) [16] [75].

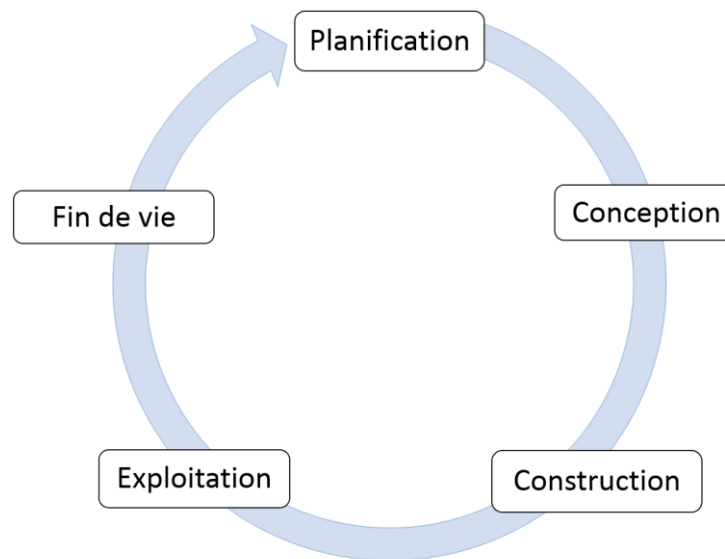


Figure 1 : Cycle de vie du bâtiment.

- **La phase de planification** : cette phase intègre, en particulier, une étude de faisabilité. Elle permet à l'équipe d'analyser le projet en fonction des besoins du client, des normes et de la réglementation foncière.
- **La phase de conception** : elle se compose de trois étapes :
 - **La conception générale** qui consiste à comparer plusieurs options de conception et à établir un premier schéma du bâtiment. Elle recouvre les activités suivantes :
 - l'identification des exigences du client,

- l'aménagement du site envisagé,
 - la planification et l'organisation de l'espace,
 - la caractérisation préliminaire des systèmes structuraux, mécaniques et électriques,
 - l'estimation du coût total du projet et des frais d'exploitations annuels.
-
- **La conception détaillée** qui, à ce stade, est plus approfondie. À la fin de cette phase, des plans enrichis sont générés, comprenant généralement la modélisation 3D de l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et une proposition de systèmes d'éclairage et de CVC (Chauffage, Ventilation, Climatisation).
 - **L'analyse** qui permet l'évaluation des performances (notamment énergétiques) du bâtiment à partir des éléments mécaniques, électriques et de CVC. Cette phase réalise une évaluation de l'impact à long terme du projet. Des modifications au niveau la conception ou du choix des différents systèmes peuvent alors être proposées.
-
- **La phase de construction :** cette phase recouvre les activités relatives à la construction effective du projet (le transport des matériaux et produits sur le site du projet, l'utilisation d'outils et d'équipements électriques lors de la construction du bâtiment, la fabrication sur place d'éléments).
 - **La phase d'exploitation :** cette phase concerne l'utilisation et la maintenance du bâtiment. Les paramètres d'intérêt de cette phase sont en particulier la consommation d'énergie et d'eau et la production de déchets. La réparation ou le remplacement des composants du bâtiment et des systèmes (réhabilitation, évolution de l'usage) est également l'une des problématiques de cette phase.
 - **La phase de fin de vie :** cette phase concerne la démolition (ou la rénovation profonde) du bâtiment, à l'issue de sa phase d'exploitation. Le transport des matériaux de construction et des déchets en est une activité importante. Les activités de recyclage et de réutilisation liées aux déchets de démolition peuvent également être prises en compte à ce niveau.

C'est pendant la phase de construction que se déroule l'extraction des matières premières pour fabriquer les produits de construction, jusqu'à la mise en œuvre et l'assemblage de ceux-ci pour la réalisation du bâtiment. Les impacts de cette phase sont principalement relatifs au type et à la provenance des matériaux utilisés. Par contre, c'est la phase d'exploitation qui impacte le plus l'environnement, avec une consommation

énergétique importante due au chauffage, à la production d'eau chaude sanitaire, à l'éclairage et la ventilation.

C'est au cours de la phase de conception (plus précisément durant l'étape de l'analyse) que l'on réalise une prédiction de la consommation énergétique du bâtiment et que l'on fixe un objectif d'efficacité énergétique à atteindre. Les outils logiciels de simulation de l'énergie sont un élément important de la phase de conception – ils sont utilisés de façon systématique par les concepteurs de bâtiments afin d'optimiser les choix de conception en fonction des objectifs de performances du projet. C'est donc sur cette partie du cycle de vie que nous nous focalisons dans le cadre de ce travail de thèse.

I.2. Outils pour la simulation énergétique du bâtiment

Les logiciels de simulation couvrent désormais de nombreux aspects, notamment la modélisation des structures, de l'éclairage ou encore de l'énergie. C'est ce dernier aspect qui nous intéresse ici. Les logiciels de simulation énergétique permettent de déterminer avec précision le comportement énergétique (la consommation en particulier) des bâtiments en fonction des caractéristiques envisagées pour assister les concepteurs dans leurs choix. Il existe de nombreux outils logiciels de simulation énergétique sur le marché : à titre d'exemple, le répertoire BEST [120] qui rassemble une partie de l'offre d'outils de simulation énergétique pour le bâtiment recense 112 outils (en janvier 2016).

Les outils logiciels de simulation énergétique ont un impact réel sur la réduction de la consommation énergétique des bâtiments, en permettant de :

- déterminer les besoins énergétiques et dimensionner les systèmes de CVC (Chauffage – Ventilation – Climatisation),
- analyser la consommation d'énergie,
- calculer le coût de l'énergie utilisée.

Nous allons nous intéresser plus particulièrement aux outils de simulation thermique dynamique (STD). La STD porte sur le calcul de l'évolution de l'état thermique d'un système dans le temps (par opposition à un calcul statique où l'on ne s'intéressera pas à l'évolution temporelle des grandeurs). Ce type de simulation est très utilisé dans le bâtiment afin d'évaluer les consommations futures d'énergie en prenant en considération plusieurs paramètres tels que l'enveloppe du bâtiment, les caractéristiques des systèmes de CVC, les scénarios d'usage et les paramètres extérieurs. Parmi les outils de STD les plus répandus, on peut citer au niveau international EnergyPlus et TRNSYS, et au niveau national Pleiades-Comfie et COMETH (ce dernier outil étant le moteur de simulation officiel de la réglementation thermique française). Dans la suite, nous décrivons rapidement ces outils, dont nous estimons qu'ils sont les plus représentatifs, à partir des

informations fournies par la base de données des outils de simulation de l'US Dept. Of Energy [97].

- **EnergyPlus**

EnergyPlus est l'un des outils logiciels de simulation énergétique les plus connus au plan international. Son développement a commencé en 1996, parrainé par le ministère de l'Énergie (DOE) des États-Unis [98]. Initialement, le gouvernement des États-Unis a développé deux outils logiciels différents, BLAST et DOE-2, qui ont été abandonnés mais qui ont servi de base au développement d'EnergyPlus. Ce dernier associe une modélisation de l'équilibre thermique avec des capacités de modélisation génériques des systèmes HVAC (Heating Ventilation and Air-Conditioning, CVC en français). Il est à noter qu'EnergyPlus ne fournit pas d'interface graphique permettant aux utilisateurs de visualiser le bâtiment. Il est donc nécessaire, pour cela, d'utiliser des outils tiers (par exemple, Design Builder [3]).

EnergyPlus est utilisé par les architectes, les bureaux d'études et les chercheurs afin de modéliser la consommation d'énergie et d'eau dans les bâtiments. L'outil repose sur des modèles physiques de chauffage, de refroidissement, de l'éclairage, de la ventilation, et des autres flux d'énergie et de la consommation d'eau. La modélisation du bâtiment est divisée en deux étapes [50], [51] :

- la construction du bâtiment et des espaces, en premier lieu,
- puis l'ajout des propriétés et systèmes, tels que les aspects environnementaux, les effets de l'ombrage, le système de refroidissement, les gains internes, etc.

- **TRNSYS**

TRNSYS est un outil logiciel de simulation du système transitoire doté d'une structure modulaire qui a été spécialement conçue pour modéliser des systèmes complexes du domaine énergétique, en décomposant le système en un certain nombre de composants élémentaires [121]. Les composants (appelés « Types » dans TRNSYS) peuvent aller de la simple pompe à chaleur à un ensemble de bâtiments multizones. Les composants sont configurés via l'interface utilisateur graphique TRNSYS Simulation Studio [8]. Dans l'outil de simulation TRNSYS, le bâtiment peut être modélisé à l'aide de l'interface visuelle dédiée TRNBuild [50].

L'outil logiciel permet de configurer un pas de temps de (typiquement) quinze minutes à une heure, mais donne également la possibilité d'effectuer des simulations plus fines (jusqu'à 0,1 secondes). L'outil fournit également des bibliothèques de composants, comprenant notamment un grand nombre de systèmes HVAC. Il permet également la création de routines pour personnaliser le déroulement de la simulation. La nature

modulaire de cet outil logiciel et la possibilité de spécifier finement les algorithmes de contrôle des systèmes, en font un outil apprécié pour les modélisations les plus complexes.

- **Pléiades+Comfie**

Pléiades est un environnement logiciel pour la construction et l'éco-conception. Il comporte :

- une importante bibliothèque personnalisable de composants du bâtiment, liée à EDIBATEC, la base de données française des produits manufacturés du bâtiment;
- ALCYONE [1], une entrée graphique 2D et interface d'affichage 3D. ALCYONE peut également importer des modèles Google SketchUp [4];
- COMFIE [2], un moteur de calcul multizone pour les simulations d'énergie dynamiques de bâtiments, développé par ARMINES et Mines ParisTech ;
- les modules français de conformité de la réglementation thermique (RT 2012, RT existants) ;
- des modules de dimensionnement des équipements de chauffage et de climatisation ;
- un grand nombre de fonctionnalités de sortie (graphiques personnalisables, rapports automatisés, feuilles de calcul, etc.).

COMFIE est un moteur de calcul qui se base sur un modèle multizone. Il comprend également des centaines de sorties liées aux équipements (consommation, propriétés physiques, etc.). Le modèle de bâtiment COMFIE peut également être couplé à des modules spécialisés (ventilation naturelle, production photovoltaïque, échangeur de chaleur sol-air, éclairage artificiel).

- **COMETH (COre for MOdelling Energy and Thermal Comfort)**

Le moteur de simulation réglementaire français est appelé COMETH pour COre for MOdelling Energy and THERmal Comfort. C'est un moteur de calcul développé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Il se base sur la réglementation thermique française RT2012. Il est orienté objet et l'organisation du code favorise une approche modulaire permettant le remplacement aisé de modèles ou l'ajout de systèmes [63], [59].

Le modèle thermique détermine les besoins en énergie à fournir au bâtiment pour chaque pas de temps (heure), compte tenu des conditions intérieures (déperditions, apports solaires, apports internes, occupants, etc.) et extérieures (température, ensoleillement, vent, etc.) mais aussi de la dynamique interne du bâtiment (inertie, intermittence, etc.).

Ces besoins sont ensuite majorés par des pertes de distributions calculées à partir de caractéristiques géométriques et des réseaux énergétiques (longueur, débit, classe d'isolation).

COMETH calcule les consommations de refroidissement d'un bâtiment de la même manière que les consommations de chauffage (émission, distribution, génération).

I.3. Notre enjeu : faciliter et fiabiliser l'utilisation des outils de simulation énergétique pendant la conception

En raison de l'impact considérable des bâtiments sur l'environnement, il est essentiel pour les concepteurs de pouvoir optimiser la performance énergétique des bâtiments. Il est donc nécessaire que la conception et l'analyse soient réalisées de concert, et ce, dès la première étape de la création d'un bâtiment. C'est en effet durant ces phases, que l'on peut prédire et évaluer la consommation énergétique du bâtiment, et faire les choix les plus impactant pour l'optimisation de l'efficacité énergétique. Au cours de la phase d'exploitation, on pourra poursuivre l'analyse afin de vérifier si l'objectif de performance énergétique défini en conception est atteint – mais les choix effectués en conception pourront rarement être revus à ce stade, pour des raisons de coût et de faisabilité.

Ce travail de thèse se situe au niveau de la phase de conception du bâtiment, lorsque l'appui des outils logiciels aux concepteurs a l'impact le plus important. Les capacités d'analyse apportées par les outils sont en effet un des moyens les plus efficaces pour s'assurer de l'efficacité des stratégies de conception et évaluer l'efficacité énergétique. Notre travail visera à faciliter voire à permettre la systématisation de l'utilisation des outils de simulation en conception. Tout en souhaitant pouvoir viser un nombre d'outils aussi large que possible, nous avons pris la décision, sur la base du panorama proposé dans la section précédente, d'axer notre travail en priorité sur deux outils de simulation: EnergyPlus, qui est l'outil le plus utilisé à l'échelle internationale ; et COMETH, qui est un outil réglementaire au niveau national. Il est à noter que cette thèse vise prioritairement, pour ce qui concerne le prototype en particulier, l'outil COMETH. Les travaux portant sur EnergyPlus, qui constituent une extension de cette thèse, seront réalisés ultérieurement.

On a vu dans la section précédente que les outils de simulation prenaient en entrée une information détaillée sur le bâtiment : lors de la conception, toutes les données de construction telles que les types des matériaux, les informations géométriques, les caractéristiques des espaces et installations, doivent être accessibles afin d'évaluer la performance énergétique. Les différentes parties prenantes de l'équipe de conception et de construction vont développer des modèles spécifiques de manière séparée, en utilisant des outils propres à leur domaine d'application. Afin d'améliorer les échanges de données entre ces acteurs, un des principaux axes explorés a été la définition d'un modèle de données numérique commun pour le bâtiment afin de faciliter le partage d'information entre tous les acteurs impliqués par le cycle de vie d'un bâtiment. Ce concept n'est autre que le Building Information Modeling (BIM) [55], que nous détaillons dans la section suivante.

II. Building Information Model (BIM)

Dans cette section, nous décrivons les caractéristiques générales de la maquette numérique (BIM) et mettons en avant son rôle important en conception collaborative.

II.1. Caractéristiques générales du BIM

L'industrie de la construction (AEC, pour Architecture Engineering and Construction) a traversé deux transitions majeures qui ont engendré un changement de paradigme. Le premier changement majeur portait sur la transition depuis la production manuelle de dessins, esquisses, schémas vers une CAO (Conception Assistée par Ordinateur) 2D, où les plans étaient conçus à l'aide d'outils informatiques. Cependant, ces plans faisaient encore de façon générale l'objet d'un traitement manuel : impression par le récipiendaire et analyse manuelle des informations. Plus tard a eu lieu la transition vers la géométrie 3D – mais là encore, avec la nécessité d'adjoindre des informations complémentaires à la maquette – pour ensuite aller vers une évolution plus importante, où sont utilisés des modèles nD (n-dimensions) orientés objet, contenant toutes les informations pertinentes du projet et partagés entre les différents acteurs. Ce modèle numérique multidimensionnel vient compléter la représentation 3D du bâtiment par un ensemble d'informations supplémentaires : la 4D par exemple, introduit une quatrième dimension – le temps – à travers une visualisation de l'avancement du projet. Le BIM (Building Information Model) s'est ainsi peu à peu imposé et a marqué une évolution considérable dans les méthodes de conception de bâtiment.

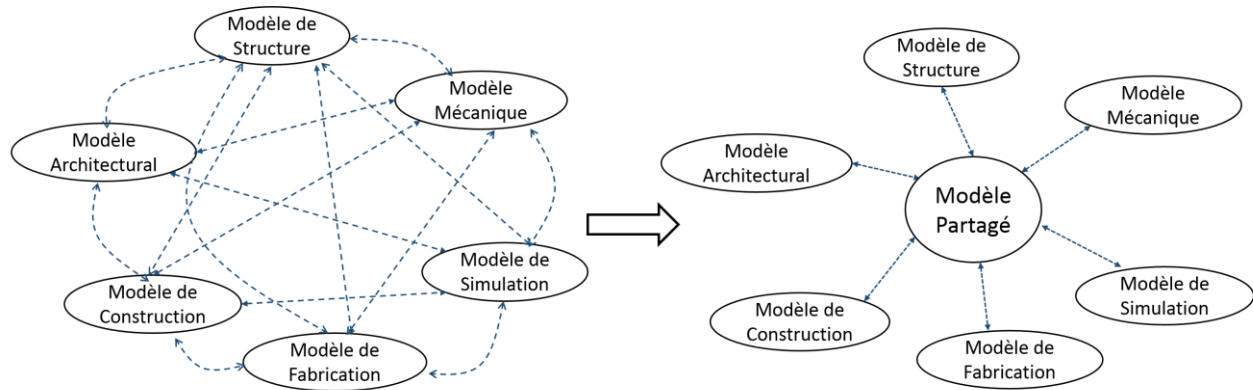


Figure 2 : Vers un modèle de conception commun et partagé.

Le BIM est donc le dernier développement des technologies CAO qui permet de concevoir, gérer et partager des informations avec les partenaires du projet (Figure 2) [55]. C'est l'ensemble du processus de génération, de gestion des données et des informations sur le bâtiment au cours de son cycle de vie qui est impacté, depuis sa conception jusqu'à sa démolition ou sa rénovation [115], [114], [66]. Un apport fondamental du BIM est de permettre la collaboration de plusieurs disciplines à différents stades du cycle de vie du bâtiment [117].

Le BIM a concentré l'attention de l'industrie AEC ces dernières années [22] et la majorité des entreprises de construction et d'architecture ont lancé leur transition depuis la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) vers le BIM [83]. Ceci s'explique par les nombreux bénéfices en lien : en CAO, les différents intervenants du projet utilisent des vues indépendantes et lorsqu'elle est modifiée, il est nécessaire de modifier toutes les vues impactées par ce changement. A l'inverse, lorsque le BIM est utilisé comme modèle partagé, une connexion est établie de facto entre les différents domaines et acteurs. Cela engendre un gain de temps considérable et une diminution importante du taux d'erreur.

Il serait à noter que le degré de mise en œuvre du BIM peut varier significativement. Van Berlo [123] fait notamment la distinction entre « Big BIM » et « Little BIM » [73]. Le « Little BIM » fait référence à un projet limité à un domaine d'application et reposant sur un outil propriétaire unique. Le « Big BIM », à l'opposé, repose sur une collaboration entre les partenaires du projet. Il est basé sur un environnement logiciel polyvalent, où les différentes parties prenantes du projet peuvent collaborer en utilisant différents outils logiciels. Pour résumer, le BIM, dans le cadre du « Big BIM », est un processus reposant sur un environnement de travail collaboratif [26], assurant en particulier l'échange des données de construction entre des outils et acteurs de domaines variés.

Un avantage clé du BIM réside dans sa capacité à accompagner l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, y compris les étapes de construction, de fabrication et

d'approvisionnement [55], ce qui se traduit par des bénéfices à toutes les étapes du cycle de vie [60] : coût diminué, temps de mise en œuvre réduit, qualité et productivité accrues sont les principaux avantages cités dans la littérature.

II.2. Vers un cycle de vie collaboratif basé sur le BIM

La section précédente a montré que le BIM est donc un modèle de données pour la conception des bâtiments, la construction et le suivi du projet, pouvant être utilisé durant tout le cycle de vie d'un bâtiment et potentiellement partagé entre tous les acteurs impliqués. Les échanges collaboratifs représentent alors un enjeu essentiel dans la réussite de la conduite des projets de bâtiment, puisque le BIM met en jeu différentes disciplines et corps de métier. Cela induit la nécessité d'une bonne coordination des activités entre les différents acteurs du projet.

Le BIM vise de fait à promouvoir la collaboration [113], [70], définie comme « la capacité des différents acteurs à travailler sur leur partie du projet en utilisant leurs propres méthodes de travail tout en étant capable de communiquer avec les autres participants pour atteindre un objectif commun » [70]. Sur ce point, Singh et al. [113] affirment que le BIM peut soutenir la collaboration multidisciplinaire et propose un cadre qui précise les caractéristiques et exigences techniques à prendre en compte. Sont abordées par exemple les méthodes d'accès au modèle, telles que le chargement et le téléchargement des fichiers. Cependant, le format de fichier dans lequel les données du BIM sont partagées n'est pas évoqué. Pourtant, cette question a une grande influence sur l'efficacité des supports de collaboration.

Le Building Information Modeling (BIM) est utilisé par un nombre grandissant des acteurs du secteur de l'AEC : un sondage réalisé par NBS National BIM en 2015 [84] indique qu'en 2014, l'adoption du BIM a largement augmenté : 54% des participants affirment utiliser le BIM sur au moins un projet en 2014, une hausse de 15% par rapport à l'année précédente. En 2010, seulement 13% des participants utilisaient le BIM et 43% l'ignoraient totalement. Les architectes utilisent essentiellement le BIM pour les visualisations 3D de leurs projets. Cependant, avec les progrès des outils et l'extension du spectre de leurs fonctionnalités, on peut envisager une utilisation plus large du BIM pour l'analyse : de l'éclairage, l'énergie, des émissions de carbone, etc. Dans tous les cas, les prévisions sont unanimes quant à la généralisation de l'utilisation du BIM dans un avenir proche.

Un des défis de l'industrie de la construction est de concrétiser l'utilisation du BIM non seulement comme outil dans le processus de conception, mais également comme interface unifiée pour l'échange d'informations entre les différents acteurs impliqués dans les projets. Le BIM doit donc être un vecteur efficace et fiable de collaboration et

d'échange d'informations entre les nombreux protagonistes : clients, architectes, ingénieurs, estimateurs et métresseurs, entrepreneurs et organismes de réglementation.

Comme indiqué précédemment, de façon usuelle, les informations étaient jusqu'à présent échangées sous la forme de plans et de documents. Cependant, la transition des pratiques vers une utilisation accrue de supports logiciels incite à une utilisation élargie des modèles numériques non plus seulement comme supports de l'information de conception mais également comme moyen d'échange d'informations¹. Ce mouvement se heurte cependant à une réalité complexe : les acteurs utilisent souvent des outils différents (soit issus de fournisseurs distincts soit spécifiques à leur domaine d'activité), et cette diversité d'outils constitue un défi pour l'échange de modèle. Sur ce dernier point, divers outils propriétaires sur le marché proposent des solutions d'interopérabilité, par exemple Autodesk Revit [21] et Microstation [69] mais elles sont cantonnées au catalogue des éditeurs concernés. Par ailleurs, les états de l'art sur les outils et plates-formes BIM de Howell et al. [67] et Eastman et al. [55] ont montré que les approches traditionnelles de partage de l'information via l'échange de fichiers en utilisant des formats propriétaires tels que .dxf, .dwf et .dwg ne permettent pas un transfert d'informations suffisamment riches et précises. De nouvelles approches sont donc nécessaires pour échanger des données de façon fiable et ouverte.

Sur la question de l'interopérabilité, les solutions propriétaires ont un inconvénient intrinsèque : elles s'appuient sur des formats propriétaires et de ce fait, « enferment » l'utilisateur dans l'offre du fournisseur. Or il existe de nombreux outils tiers, utilisés dans des domaines spécifiques (pour la thermique, structure, etc..), auxquels il faut être en mesure de se connecter. L'enjeu consiste en effet à pouvoir traduire les informations échangées et faire en sorte qu'elles puissent être communiquées et utilisées par les différents outils utilisés par les acteurs du cycle de vie.

Afin de rendre le BIM pleinement collaboratif, une priorité de la communauté des fournisseurs et utilisateurs d'outils est d'améliorer l'interopérabilité en favorisant l'émergence de normes et de standards tels que l'Industry Foundation Classes (IFC) [83]. L'IFC est le format d'échange ouvert de référence pour le BIM développé au cours de ces dix dernières années par le consortium buildingSMART International – un organisme dont le but est de promouvoir l'utilisation du BIM sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Un projet entièrement basé sur ce standard serait accessible et utilisable par les différents partenaires et outils des diverses disciplines.

En mettant en avant le rôle de la simulation en phase de conception, on pourrait envisager de s'appuyer sur le BIM en tant que base d'informations pour la simulation de l'énergie. Le BIM peut en effet contenir une grande partie des données nécessaires à

¹ Les incitations institutionnelles (le plan transition numérique en France ou BIM 2016 au Royaume-Uni, par exemple) ne sont pas étrangères au renforcement de cette tendance.

l'analyse d'énergie. Dans une telle approche, les outils de simulation des différentes disciplines pourraient s'appuyer sur l'information de conception issue du BIM : c'est par exemple le cas de la géométrie du bâtiment. Ceci éviterait la répétition de la saisie de données et la redondance de l'information. Mais pour cela, il faudrait que les données de conception puissent être enregistrées dans un format compréhensible à la fois par les outils de CAO et les logiciels d'analyse ciblés.

L'analyse et l'évaluation de la performance des bâtiments pourraient bénéficier de la généralisation du BIM et du développement des outils logiciels en lien [92]. En particulier, l'essor du BIM pourrait avoir un impact favorable sur l'analyse avancée des performances énergétiques : il est en effet essentiel de concevoir des stratégies pour minimiser la consommation d'énergie et aider à la conception de l'efficacité énergétique [20]. Cela nécessiterait cependant de réaliser un lien effectif entre l'information de conception et la simulation. Beaucoup de fournisseurs de logiciels tentent de résoudre ce problème en se concentrant simplement sur les liens entre deux outils spécifiques. Toutefois, cela ne profite pas à l'ensemble de la communauté. Les efforts devraient plutôt se concentrer sur l'élaboration d'un schéma unique de transfert de données, neutre et ouvert, afin qu'il puisse s'appliquer à un maximum d'outils et être utile à un maximum d'acteurs. Sur ce plan, Kumar [78] souligne dans sa thèse l'avantage évident du BIM qui offre la possibilité d'export des modèles numériques du bâtiment vers des logiciels tiers (notamment d'analyse énergétique), en se basant sur un format standard. La définition de notre problématique, décrite dans la section suivante, est donc issue de ce constat.

III. Motivations

Nous développons dans cette section la problématique qui sous-tend ce travail de thèse et détaillons les objectifs en lien. Nous décrivons également les étapes du travail réalisé, et les mettons en lien avec le plan du document.

III.1. Problématique

L'étude de l'état de l'art ci-dessus montre une évolution importante dans les pratiques des acteurs du bâtiment avec une convergence vers le numérique. Ce mode opératoire se caractérise par un passage du processus séquentiel vers l'itératif durant les phases de conception et de rénovation, avec une interaction multi-domaine. Il paraît évident que l'interopérabilité est une question clef dans la concrétisation de tels schémas de collaboration avancés, et que le BIM pourrait, sur ce point, jouer un rôle important. Egalement, il semble clair que l'utilisation d'un support neutre, ouvert et standardisé est la meilleure approche pour exploiter au mieux le potentiel des outils numériques et du BIM. L'option la plus pertinente serait donc de se baser sur le seul format d'échange de données neutre, international, ouvert et disponible : le format IFC (Industry Foundation Classes). Ce standard normalisé par le consortium buildingSMART propose la

spécification d'un modèle de données orienté objet pour le bâtiment. Le bâtiment est représenté sous la forme d'un ensemble de composants interconnectés, et dont la sémantique (au sens informatique, i.e. la fonction de l'élément et ses attributs) est clairement définie. L'IFC a pour objectif particulier de faciliter l'interopérabilité entre les différentes plates-formes logicielles utilisées en conception, et plus généralement dans le cycle de vie du bâtiment [44]. Le modèle de données IFC, généraliste, vise à l'exhaustivité, et de ce fait comprend un grand nombre d'éléments. Il a donc été doté de mécanismes permettant de le spécialiser : c'est le Model View Définition (MVD), qui permet de créer des vues spécialisées pour un domaine spécifique. Par exemple, un MVD pour l'analyse de l'énergie peut être développé en décrivant les informations nécessaires à échanger pour passer d'un modèle IFC à un modèle pour la simulation (c'est le cas qui nous intéresse ici et que nous développerons dans les chapitres suivants).

Bien que le potentiel de l'utilisation de modèles BIM pour la simulation de l'énergie soit bien connu, aucune approche systématique et exhaustive n'a jusqu'à présent vu le jour [134]. En particulier, aucune approche existante ne permet d'inclure l'ensemble des données à échanger entre les outils BIM et des logiciels de simulation énergétique (données relatives aux systèmes de CVC, scénarios d'usages, éclairage) [103].

Par ailleurs, bien que L'IFC soit considéré comme un standard du BIM, ce dernier n'est pas apte à représenter l'ensemble des éléments et propriétés nécessaires à la simulation. L'IFC permet de définir précisément la géométrie du bâtiment mais présente encore beaucoup de manques dans d'autres domaines (par exemple la représentation des systèmes) et il est nécessaire d'ajouter à l'IFC des données issues de sources externes. Ce constat est en particulier valide pour le domaine de la simulation énergétique.

III.2. Objectifs de la thèse

Un des facteurs clés de l'amélioration de l'interopérabilité dans le cycle de vie du bâtiment est l'adoption de l'IFC par l'ensemble des outils du cycle de vie du bâtiment. Mais une approche plus pragmatique et plus réaliste consiste à faciliter la connexion entre le BIM et les outils tiers – en particulier la simulation énergétique. Ce constat est partagé par la communauté, ce qui se traduit par des efforts de recherche visant à améliorer l'interopérabilité entre les modèles BIM architecturaux et les outils pour la simulation énergétique [61], [45], [82].

L'optique de ces travaux vise à extraire de façon automatisée du BIM les données pertinentes pour la simulation, réduisant ainsi l'effort de ressaisie nécessaire. Une saisie manuelle des données d'entrée présente en effet deux inconvénients : des efforts et du temps, et une probabilité plus grande de rentrer des données erronées (notamment pour ce qui concerne la géométrie du bâtiment). Dans la plupart des cas, il est cependant impossible d'automatiser en totalité la connexion : le BIM n'a pas vocation à contenir

l'ensemble des informations requises par les outils de simulation et les données telles que le climat, ou encore les scénarios d'usage, nécessitent de s'appuyer sur d'autres sources.

Cette thèse se positionne dans ce même champ de recherche. Notre objectif est d'apporter une réponse au problème d'interconnexion entre deux modèles de données hétérogènes (BIM et modèle tiers) dans le cycle de vie du bâtiment. Le cas d'étude que nous avons sélectionné est le lien entre le BIM (représenté au format IFC) et un modèle de simulation thermique dynamique. Notre volonté est de définir une approche (méthode et outils) polyvalente (i.e. non liée à un outil de simulation spécifique), ouverte et extensible. Nous pensons également que l'IFC constitue une base pertinente mais présente des lacunes qu'il faudra compenser.

Pour cela, nous proposons le concept présenté en Figure 3, et qui consiste à extraire une vue du modèle IFC contenant la ou les parties du modèle pertinentes pour notre application, puis d'exploiter cette vue pour définir et implémenter un modèle intermédiaire qui fera le lien avec le modèle du moteur de simulation.

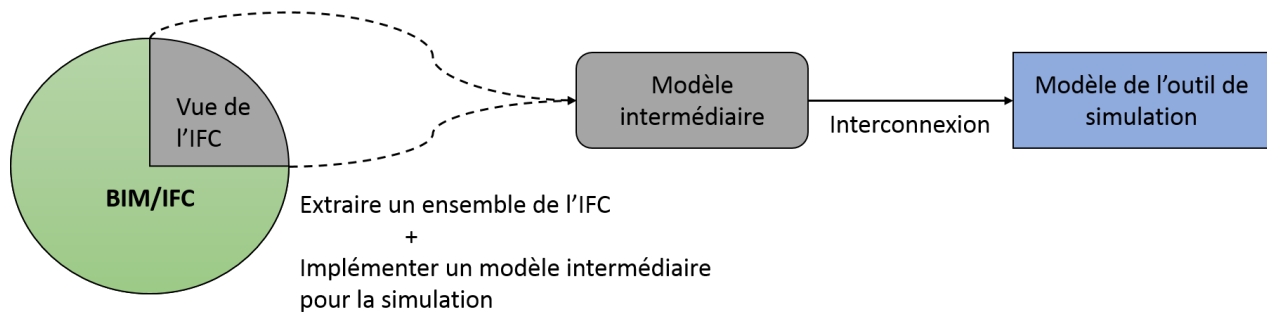


Figure 3 : Objectif schématique de la thèse : depuis le BIM IFC vers la simulation.

Ce travail implique de mettre en correspondance les éléments du bâtiment tels que définis dans le moteur de simulation ciblé et les éléments et les attributs IFC correspondants, mais également de fournir un modèle intermédiaire pour la simulation jouant le rôle d'une interface entre le modèle de départ (BIM) et le modèle de l'outil de simulation visé.

III.3. Contributions de la thèse

Sur la base de l'objectif énoncé dans la section précédente, le travail de thèse s'est déroulé en plusieurs étapes visant à préciser les contours de nos contributions et à les réaliser. Nous avons donc mené un état de l'art ciblé sur les principales questions en lien avec notre problématique et, sur cette base, avons défini trois contributions portant à la fois sur les aspects méthodologiques et l'outillage logiciel. Elles portent sur la modélisation du processus de construction des modèles de simulation à partir du BIM,

sur une approche originale d'extraction des données du BIM pour la simulation, et sur la conception et le développement d'un outil logiciel dédié.

Le manuscrit a été structuré de façon à mettre en évidence ces différentes étapes :

- le premier chapitre a mis en avant le rôle important de la simulation énergétique en conception du bâtiment. Il a également introduit la notion de Building Information Model, en insistant sur l'apport du BIM dans le travail collaboratif. Sont également mises en évidence les limites des outils numériques pour la conception du bâtiment sur la question de l'interopérabilité et en particulier sur le lien entre BIM et simulation énergétique. Cette analyse a permis de préciser la problématique et les objectifs de la thèse.
- dans le chapitre 2, nous revenons en détails sur la notion de Building Information Model, en particulier sur les différents formats et standards disponibles. Ce chapitre comprend également une étude de l'état de l'art sur les propositions d'amélioration de l'interopérabilité dans le BIM.
- dans le chapitre 3, nous décrivons notre première contribution : une spécification des processus de traduction BIM-simulation et la formalisation des échanges de données associés, basée sur l'application critique de deux outils méthodologiques standards : l'IDM (Information Delivery Manual) et le MVD (Model View Definition).
- dans le chapitre 4, la deuxième contribution est introduite. Elle porte sur la définition d'un modèle pivot pour la traduction BIM – simulation énergétique, permettant d'améliorer l'interopérabilité entre le BIM et les outils de simulation d'énergie. Ce modèle que nous appelons le « Building Simulation Model » (BSM) est basé sur la contribution présentée dans le chapitre 3.
- dans le chapitre 5, nous présentons le prototype logiciel développé pour mettre en œuvre le canevas méthodologique issu des deux contributions évoquées précédemment, en ciblant le moteur de simulation réglementaire français (COMETH). Nous présentons également les résultats des tests menés pour valider ce prototype sur une étude de cas.
- enfin, dans le chapitre 6, nous présentons une analyse des contributions et résultats, en mettant en avant les bénéfices ainsi que les limites de l'approche et du prototype. Nous proposons également des perspectives d'améliorations et de développements additionnels.

Chapitre 2 Building Information Model pour l'interopérabilité en conception

Sommaire

I. Etat de l'art sur les formats et standards du BIM	18
I.1. Les formats et standards ouverts dans le BIM	19
I.2. Les formats propriétaires	21
I.3. Synthèse sur les modèles et formats de données et analyse des limites	22
II. Approches d'extension et d'enrichissement du BIM IFC	24
II.1. Les mécanismes d'extension du modèle IFC	24
II.1.1. Mise à jour du méta-modèle du standard IFC	24
II.1.2. Extensions à l'aide des mécanismes natifs de l'IFC	25
II.2. Enrichissement sémantique du standard IFC	26
II.2.1. Enrichissement à l'aide de l'IFD (International Framework for Dictionaries)	26
II.2.2. Enrichissement sémantique de l'IFC à l'aide d'ontologies	27
II.3. Synthèse et définition de nos orientations de recherche	29
III. Outils pour la spécification des processus de transmission et de transformation de l'information de conception	32
III.1. Information Delivery Manual (IDM)	33
III.2. Model View Definition (MVD)	33
Conclusion	34

L'interopérabilité est un concept venant du domaine informatique, qui porte sur la communication et le partage d'information entre différents domaines, acteurs et outils. Cette notion est essentielle dans la mise en œuvre du BIM. L'interopérabilité permet en effet la réutilisation de données disponibles tout en garantissant la cohérence de l'information pour l'ensemble des activités réalisées. Un bon niveau d'interopérabilité et la possibilité pour les équipes projet d'avoir à disposition des données cohérentes et exactes, peuvent contribuer de manière significative à la diminution du temps de conception et à une diminution importante des coûts en lien.

Dans ce chapitre nous allons nous focaliser sur la question de l'interopérabilité en conception basée sur le BIM, dans le cadre de laquelle ce sujet de thèse est développé. Nous présenterons les différents formats de données utilisés pour le BIM (à la fois les formats ouverts et les formats propriétaires). L'IFC sera mis en exergue, étant considéré comme le standard de référence pour les échanges de données BIM. Les limites de ce format, en regard des objectifs d'interopérabilité, seront également identifiées. Au-delà des modèles et formats de données, nous exposerons de façon plus générale les approches et solutions de l'état de l'art qui visent l'amélioration de l'efficacité des échanges de données dans les projets de bâtiment. Dans ce cadre, nous présenterons en particulier une méthode complémentaire à l'IFC qui permet une meilleure structuration des interactions et une définition plus précise des échanges de données.

I. Etat de l'art sur les formats et standards du BIM

Dans le domaine des technologies de l'information de la communication (TIC), où il est commun que plusieurs intervenants ou équipes de différents domaines aient besoin de réaliser un partage et un échange de données au travers d'outils hétérogènes, l'interopérabilité est largement reconnue comme un enjeu majeur.

L'interopérabilité des données telle que définie par [111] est la capacité à garantir que les données générées par une partie puissent être interprétées correctement par toutes les autres parties. L'interopérabilité des données permet un échange fiable et efficace de l'information : c'est la première étape vers l'intégration efficace des systèmes et la collaboration.

Jim Steel [116] a identifié trois niveaux d'interopérabilité en conformité avec le cadre KISS (Knowledge Industry Survival Strategy) de la classification de l'interopérabilité [33] :

- Au niveau des fichiers et de la syntaxe : au niveau fichier, l'interopérabilité est la capacité de deux (ou plus) outils en communication à échanger des fichiers avec succès. L'interopérabilité au niveau de la syntaxe est la capacité de ces outils à analyser correctement ces fichiers sans erreurs.

- au niveau de visualisation : c'est la capacité des outils à lire et à visualiser correctement les modèles échangés,
- au niveau sémantique : c'est la capacité des outils à avoir une compréhension partagée des modèles échangés.

La question de l'interopérabilité est prégnante dans l'ensemble des domaines où la collaboration, l'interaction et l'échange de données sont nécessaires. Ceci s'applique en particulier à l'industrie AEC (*Architecture, Engineering and Construction*), où l'évolution des pratiques et la généralisation de l'utilisation du BIM ont intensifié le besoin de collaboration entre les différents acteurs dans le cycle de vie du bâtiment.

I.1. Les formats et standards ouverts dans le BIM

Selon Merschbrock [91], l'interopérabilité dans le BIM est l'une des problématiques les plus importantes de l'industrie AEC. La plupart des auteurs soulignent que, pour assurer les trois niveaux d'interopérabilité (KISS) et faciliter l'échange d'informations, il est nécessaire de normaliser les modèles de données et les formats du BIM et de définir des lignes méthodologiques claires pour une mise en œuvre structurée des processus.

Un grand nombre de formats de données est usuellement utilisé dans les projets de bâtiment, certains étant ouverts, les autres étant propriétaires et en lien avec des outils commerciaux. Une grande partie des standards ouverts pour le bâtiment est fondée sur le modèle de données EXPRESS [71], qui est un (méta) langage de modélisation orienté objet normalisé (ISO 10303-11). En complément, des formats de données structurés standards sont souvent utilisés. L'eXtensible Markup Language (XML) [118], en particulier, qui est un standard très populaire pour l'échange d'informations structurées. Le tableau 1 récapitule les principaux modèles et formats de données utilisés dans le bâtiment.

Modèles de données bases sur EXPRESS	Formats de données basés sur XML
<ul style="list-style-type: none"> – STEP (Standard for the Exchange of Product model data) – CIS/2 (CIMsteel Intégration Standard, Version 2) – IFC (Industry Foundation Classes) 	<ul style="list-style-type: none"> – CityGML – landXML – gbXML (Green Building XML) – aecXML – ifcXML

Tableau 1 : Les modèles de données et formats ouverts du BIM.

Les modèles les plus utilisés, basés sur EXPRESS, sont STEP, CIS/2 et l'IFC.

- STEP (Standard for the Exchange of Product model data) propose une spécification pour la modélisation des données (en particulier géométriques) de composants mécaniques (pièces élémentaires, assemblages, mécanismes, etc.) [128]. Il apporte une réponse au problème de l'échange d'information entre les applications du cycle de vie des produits. Le format STEP a été utilisé dans plusieurs domaines d'application (notamment électronique et mécanique), pour soutenir l'ingénierie collaborative à travers tout le cycle de vie du produit [104]. Il est à la base des principales spécifications de modèle de données du bâtiment (IFC, CIS/2 [54]).
- CIS/2 (CIMsteel Intégration Standard, Version 2) est un modèle basé sur la technologie ISO-STEP, largement adoptée au sein de l'industrie de la construction en acier [54]. Il est l'un des premiers modèles de produits qui ont été largement adoptés par l'industrie, permettant de faciliter l'échange de données entre applications hétérogènes.
- IFC (Industry Foundation Classes) est un modèle ouvert orienté objet qui constitue le standard de représentation numérique du bâtiment dans l'industrie AEC. Il est développé par l'IAI (International Alliance for Interoperability / buildingSMART). Le but de l'IFC est de faciliter l'échange et l'utilisation de l'information numérique du bâtiment et il est utilisé par les professionnels de l'AEC tout au long du cycle de vie du bâtiment [137]. Aujourd'hui, de nombreux outils propriétaires offrent un support pour l'IFC grâce à des fonctions d'import et d'export : Autodesk, Bentley system, Graphisoft, Nemetschek, Solibri, Tekla, Archimed group, Vector works, etc.

Les formats de données suivants, développés sur la base de XML, font également l'objet d'une utilisation importante dans l'industrie AEC :

- CityGML : ce schéma est utilisé pour la représentation des données géo-spatiales. C'est la norme de référence pour représenter les informations 3D du territoire, en particulier du milieu urbain. C'est un modèle orienté objet qui permet aux caractéristiques sémantiques, géométriques et topologiques d'être caractérisées pour chaque objet [140]. La dernière version a été publiée en avril 2012.
- LandXML : spécifie un format de fichier XML pour les données de conception du génie civil. C'est un standard largement utilisé par près de 800 membres dans le secteur des routes et du transport routier.
- gbXML (Green Building XML) : est utilisé pour décrire les données relatives à l'efficacité énergétique du bâtiment et à son impact sur l'environnement. Il a pour

but de simplifier le transfert des données du bâtiment vers et à partir les outils d'analyse de l'ingénierie [108].

- aecXML : est un dérivé de l'IFC utilisé pour décrire les données de construction en phase de conception, d'ingénierie et de construction. Il comprend des schémas XML pour décrire les informations spécifiques à la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments, des usines, des infrastructures et des installations [47].
- ifcXML : En plus de la spécification IFC-EXPRESS, une spécification de ifcXML est disponible [43] (depuis la sortie de la version IFC2x). L'ifcXML est une syntaxe XML pour l'IFC : il spécifie la syntaxe XML des éléments définis dans le schéma IFC [79].

1.2. Les formats propriétaires

La plupart des outils logiciels de planification et de conception commerciaux disposent de leur propre format de représentation de données. Beaucoup de formats propriétaires actuels sont axés sur la géométrie du bâtiment et sont insuffisants pour communiquer des données BIM. Cependant, dans le monde de la CAO, ils sont couramment utilisés et ils font en général l'objet de fonctionnalités d'échange (import et export) vers d'autres formats du BIM (notamment l'IFC). Les descriptions suivantes portent sur les formats commerciaux les plus répandus, en particulier ceux – extrêmement populaires – d'Autodesk.

- RVT (Autocad Revit) : signifie « Autodesk Revit Architecture project file ». Il est le format natif du logiciel de conception de bâtiment Autodesk Revit [21]. Il est utilisé par les produits Autodesk Revit et il est conçu pour une utilisation avancée de la maquette numérique.
- DWG (DraWinG Autocad) : est le format de fichier natif du logiciel AutoCAD [19], qui est un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO) développé également par Autodesk.
- DGN (design) : est le format de fichier natif de l'outil MicroStation développé par Bentley Systems, un autre logiciel propriétaire de CAO [68]. Il est compatible avec AutoCAD.
- DXF (DraWinG Exchange Format) est un format de fichier ouvert développé par Autodesk pour permettre l'interopérabilité entre AutoCAD et d'autres programmes.

	Autocad Revit Autodesk	Microstation Bentley Systems	ArchiCAD Graphisoft
Formats propriétaire supportés	RVT, DWG, DXF	DGN, DXF	DWG, DGN
Compatible avec	gbXML, IFC	IFC, CIS/2, STEP	IFC, gbXML, IFCXML

Tableau 2 : Compatibilité des outils propriétaires avec des formats ouverts.

Le tableau ci-dessus (Tableau 2) résume les formats propriétaires utilisés par ces outils, ainsi que les formats ouverts qui sont pris en charge. AutoCAD Revit est compatible avec les normes d'échange de données open-BIM (IFC et gbXML). Microstation de Bentley Systems, est aussi compatible avec l'IFC et prend aussi en charge CIS/2 et STEP. Quant à Graphisoft il prend en charge l'IFC, gbXML et IFCXML. On peut facilement noter que seul l'IFC est supporté par tous ces outils propriétaires.

I.3. Synthèse sur les modèles et formats de données et analyse des limites

L'objectif fondamental du BIM est de faciliter la communication et la collaboration entre les disciplines grâce à l'interopérabilité des données tout au long du cycle de vie de la construction. Il est donc préférable que les formats du BIM couvrent le plus grand nombre possible de domaines métiers. Le tableau 3 résume les caractéristiques des formats décrits dans la section précédente, et indique pour chacun leur niveau de couverture des principaux domaines d'intérêt : architecture, structure, données SIG, travaux publics, et analyse énergétique.

A l'aide du tableau 3, on remarque que la majorité des formats décrits se concentrent sur le domaine architectural : on y retrouve STEP, aecXML, ifcXML ainsi que tous les formats propriétaires (RVT, DWG, DGN, DXF). Les formats comme CityGML, landXML et CIS/2 couvrent chacun un domaine bien spécifique, respectivement les données SIG, le domaine des travaux publics et le modèle de structure. Par contre, on remarque que l'IFC couvre plusieurs domaines d'application dans un projet AEC : le modèle architectural, le modèle de structure, ainsi que l'analyse d'énergie. C'est donc est un modèle complet pour la conception et la gestion d'un bâtiment. Il contient non seulement toutes les informations liées à la structure du bâtiment (murs, matériaux, canalisations) mais aussi les données nécessaires à sa gestion. C'est pour ces raisons qu'il est considéré comme le standard du BIM et qu'il est pris en charge par la plupart des outils de conception du bâtiment.

Type de format	Format d'échange		Modèle Architectural	Modèle de structure	Données SIG	Travaux Publics	Analyse d'énergie
Formats OpenBIM	Basés sur EXPRESS	STEP	X				
		CIS/2		X			
		IFC	X	X			X
	Basés sur XML	CityGML			X		
		LandXML				X	
		gbXML					X
		aecXML	X	X			
		ifcXML	X				
Formats Propriétaires	RVT		X				
	DWG		X			X	
	DGN		X			X	
	DXF		X				

Tableau 3 : Les formats d'échange et leur spectre applicatif.

Cependant, lorsqu'il s'agit d'assurer l'interopérabilité dans le cycle de vie du bâtiment, l'IFC présente certaines limites. Ces limites tiennent en particulier à la structure généraliste de l'IFC, qui décrit finement la géométrie du bâtiment mais dont la granularité, pour ce qui concerne la caractérisation des composants de la construction et des systèmes, peut dans certains cas être insuffisante. On est confronté à ces limites lorsqu'on est emmené à utiliser l'information issue de l'IFC pour un domaine bien particulier (par exemple la simulation énergétique, mais aussi la planification de chantier ou l'analyse de cycle de vie). Certaines informations peuvent alors manquer et il est souvent nécessaire de recueillir des données supplémentaires à partir de sources externes. Cela peut être pertinent sous réserve que les connexions entre modèles permettent d'exploiter de façon fiable des données externes. Une autre possibilité est d'étendre et enrichir l'information contenue dans l'IFC. Deux options sont alors possibles : la première consiste à se baser sur les mécanismes d'extension disponibles dans le standard IFC ; la deuxième est d'enrichir et préciser la sémantique des éléments IFC telle que spécifiée dans le méta-modèle.

L'identification de ces limites a donné lieu à un nombre important de travaux de recherche, qui ont visé à l'extension et/ou à l'enrichissement de l'IFC, notamment en se

basant sur des approches issues de domaines connexes, en particulier celles basées sur le web sémantique. Dans la section suivante, nous proposons une revue critique de ces travaux.

II. Approches d'extension et d'enrichissement du BIM IFC

Tout au long du chapitre précédent nous avons mis en avant l'importance de la collaboration entre les différents intervenants autour du BIM. L'IFC, étant le standard de référence, doit répondre pleinement au besoin d'interopérabilité. On retrouve donc dans la littérature des travaux qui visent à concrétiser cette vision. Ces approches, comme on va le voir dans cette section, se divisent en deux catégories : celles visant à l'extension de l'IFC (i.e. l'ajout d'éléments ou d'attributs) et celles visant à l'enrichissement sémantique de l'IFC (i.e. permettant de préciser et/ou formaliser la sémantique d'éléments existants).

II.1. Les mécanismes d'extension du modèle IFC

L'IFC décrit les éléments du bâtiment et leurs propriétés. Cependant, il est parfois nécessaire d'étendre le méta-modèle et d'utiliser des sources de données supplémentaires en lien avec le domaine d'application visé. Nous donnons ci-dessous un résumé des différentes options disponibles pour étendre l'IFC.

II.1.1. Mise à jour du méta-modèle du standard IFC

Liebich et al. proposent dans [85] une classification des options disponibles pour étendre ou spécialiser le standard IFC. La plus évidente, et la première présentée, consiste à opérer une extension du méta-modèle de l'IFC en ajoutant de nouveaux concepts, attributs et relations (Figure 4) relatifs au domaine visé. Ces ajouts auront pour but d'intégrer à l'IFC l'information qui devait, initialement, être extraite de sources externes. Cette méthode nécessite cependant d'étendre les spécifications du modèle de données standard – et donc de suivre les processus de soumission et validation de modifications du consortium de standardisation. De ce fait, cette approche présente de nombreux inconvénients.

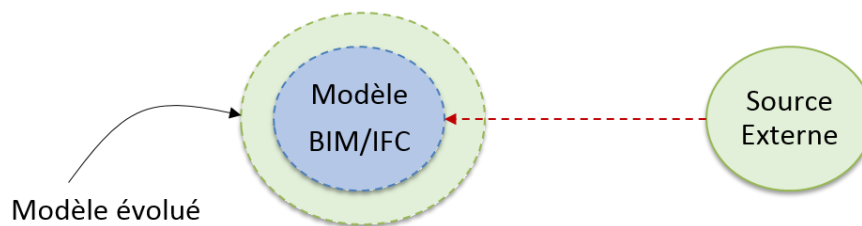


Figure 4 : Approche d'extension directe du standard IFC.

L'ajout de nouveaux éléments dans le modèle nécessite en effet le développement, la validation et l'intégration de nouveaux concepts, des attributs et des relations et prend un temps considérable. À cela il faut ajouter le temps nécessaire à la standardisation, et tenir compte du calendrier des versions du standard. De plus, la norme comprenant ainsi plus d'information, va devenir plus complexe et de moins en moins gérable. En conséquence, cette approche ne peut être utilisée que pour les cas où des adaptations à long terme, d'intérêt général, doivent être réalisées.

II.1.2. Extensions à l'aide des mécanismes natifs de l'IFC

Une autre solution consiste en l'extension des données BIM à l'aide des mécanismes déjà présents dans le standard lui-même [85]. Le modèle IFC dispose effectivement de nombreuses capacités d'extension natives par le biais de sous-classes comme « IfcRelationship » [42], « IfcProxy » [41], « IfcPropertySet » [40]. Ces approches offrent plus de souplesse. Par exemple, l'IfcPropertySet est un élément qui peut être attaché à toute classe IFC afin d'étendre la liste des propriétés (attributs) liées à cette classe (figure 5). En outre, le schéma IFC dispose d'un objet IfcProxy qui permet de décrire tous les objets qui ne sont pas définis dans le schéma. Par exemple, dans le cas de l'aménagement paysager, il n'y a pas d'éléments IFC pour les arbres ou les arbustes, donc ceux-ci sont souvent inclus comme des objets IfcProxy [116]. Enfin, il y a la possibilité de l'extension à l'aide de l'entité IfcRelationship, qui représente les relations entre les objets IFC [56], apportant des capacités d'extension supplémentaires avec la possibilité de transformer la relation entre deux classes [130].

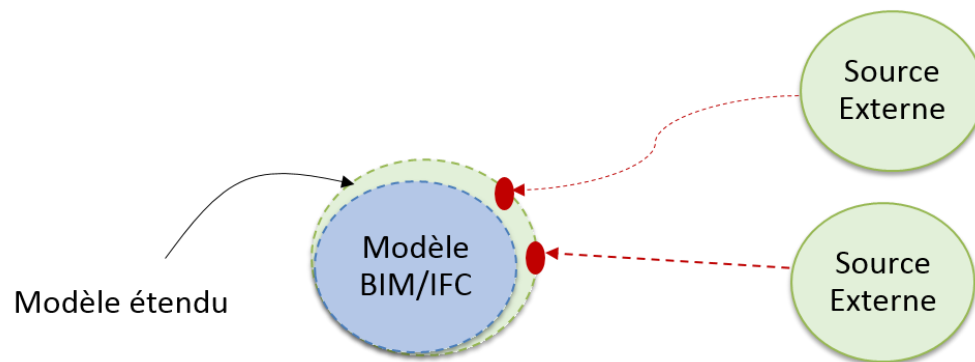


Figure 5 : Extension du modèle IFC à l'aide des mécanismes natifs du standard.

Cette approche a par exemple été appliquée dans le cadre du projet européen InPro [127], où le consortium s'est appuyé sur les « propertySet » et les « proxy » pour faire face aux exigences ne pouvant pas être traitées par l'IFC (par exemple la gestion des besoins des clients, l'estimation des coûts et de nouvelles approches pour la planification basée sur le BIM). Yang [132] présente également une méthode pour l'extension de l'IFC grâce au mécanisme d'extension IFCpropertySet (Pset). Dans cette approche, un Pset est affecté à l'objet « porte d'entrée », afin d'ajouter des propriétés supplémentaires comme la

couleur de la porte et préciser le type de porte (par exemple `fireRatingDoor` ou `externalDoor`). Une approche similaire peut être retrouvée dans l'étude de Thomas Froese [62], utilisant l'`IfcPropertySet` afin de faciliter la prise de décision dans le choix des matériaux. Un scénario d'interaction est décrit, durant lequel le concepteur peut configurer un Pset « design requirement », qui spécifie les matériaux envisagés et le fournisseur un Pset « available », qui indique la disponibilité des matériaux. Le BIM devient ainsi le support d'une interaction facilitée entre le concepteur et le fournisseur. Un autre exemple est celui du projet PLUMES [105], projet de recherche français financé par l'Agence Nationale de la Recherche, où, en raison des limitations de l'IFC, le consortium a proposé un enrichissement de l'IFC à travers l'ajout d'éléments (systèmes CVC) et de propriétés thermiques en lien. Dans ce dernier cas, également, ces extensions se sont appuyées sur la construction `IfcPropertySet`. Enfin, Liu et al. [86] préconisent l'extension de l'information du BIM pour la gestion de la qualité et la gestion de la sécurité dans la construction. Selon eux, l'extension à l'aide des `PropertySet` est flexible et simple, contrairement à l'extension du schéma IFC qui est laborieuse et prend du temps.

L'approche d'extension à l'aide des mécanismes natifs fournis par l'IFC est plus simple et rapide à mettre en œuvre que l'extension du standard. Par conséquent, elle est fréquemment utilisée (en particulier les `PropertySet`) pour étendre le modèle IFC sans impacter la norme elle-même. Mais ce type d'approche, s'il permet d'étendre le modèle, ne résout pas la question des imprécisions sémantiques de l'IFC. De nombreux travaux ont donc visé à proposer des approches pour l'enrichissement sémantique de l'IFC. Nous les présentons dans la suite.

II.2. Enrichissement sémantique du standard IFC

Si l'on se réfère à la hiérarchie KISS [116], on peut considérer que l'IFC ne traite pas le niveau d'interopérabilité sémantique. Afin de surmonter cette limitation du standard, de nombreuses recherches ont porté sur son enrichissement sémantique.

II.2.1. Enrichissement à l'aide de l'IFD (International Framework for Dictionaries)

Pour assurer l'interopérabilité, buildingSMART propose une bibliothèque appelée IFD (International Framework for Dictionaries), qui offre la possibilité de préciser la sémantique des éléments du standard. L'IFD fonctionne comme un complément à l'IFC. L'IFD permet de définir des ontologies mais ne constitue pas en soi une ontologie, étant uniquement spécifique à l'IFC [38]. Dans le domaine du Web sémantique, les « ontologies » désignent des vocabulaires qui définissent les concepts et les relations utilisés pour décrire et représenter un domaine. Tandis que l'IFD, lui, ne définit que les types des éléments. Par exemple, les entrées dans IFD pourraient être les différents types de portes que l'on peut rencontrer dans un projet.

L'IFD apporte davantage de souplesse au modèle IFC, en permettant d'affiner la définition des concepts de l'IFC à l'aide de bases de données tierces (par exemple en lien avec les systèmes CAO, systèmes de calcul, gestion des installations, etc.) [38]. Il permet d'étendre le vocabulaire et d'enrichir les relations dans le modèle IFC (voir l'exemple présenté en figure 6) : l'IFC définit le format d'échange d'information, tandis que l'IFD porte sur la façon d'interpréter les informations échangées [31].

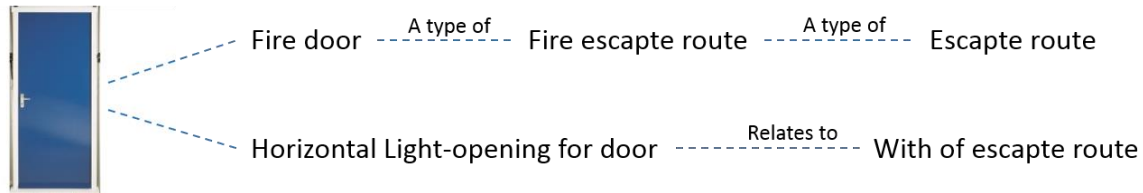


Figure 6 : Une application de l'IFD à la qualification des portes.

L'IFD comprend des concepts exprimés textuellement en langage naturel. Par exemple, un concept peut être exprimé en utilisant des noms différents : le mot « Dør » en norvégien, peut être traduit en « door » en anglais. Egalement, l'IFD fournit des synonymes, des acronymes et des définitions : un concept peut avoir plusieurs noms dans la même langue et être exprimé de différentes manières. On peut donc associer à chaque élément le ou les noms auxquels il est associé mais également mettre en évidence ses relations à d'autres éléments ou types d'élément (figure 6) [38]. Par exemple, toutes les traductions du terme « porte » (Porte, Porta, etc.) se réfèrent à la même entité.

En outre, des travaux de recherche ont porté sur l'amélioration des capacités de l'IFD. Par exemple, Mahdavi et al. [89] introduisent un prototype appelé le « SkyDreamer », basé sur les technologies du Web sémantique. Le prototype comprend un référentiel sémantique IFD qui est mis en relation avec un modèle de bâtiment IFC exprimé en ifcXML. Le référentiel sémantique IFD du prototype peut être étendu pour prendre en compte des composants de construction supplémentaires à l'aide d'une connexion de type « web service » (on peut par exemple réaliser une connexion distante entre la base de données IFC et le référentiel sémantique à travers le web). Selon Zhang et al. [136], trois facteurs sont effectivement nécessaires pour un échange d'informations BIM efficace : l'IFC comme un format d'échange, l'IDM (Information Delivery Manual, décrit en détails dans le chapitre 3) pour préciser le schéma d'échange et l'IFD pour une compréhension uniforme des informations échangées.

II.2.2. Enrichissement sémantique de l'IFC à l'aide d'ontologies

Une forte tendance, pour l'enrichissement sémantique de l'IFC, consiste à réaliser un lien entre l'IFC et des ontologies, en particulier sur la base des solutions issues du domaine du web sémantique [23], [36], [72], [122], [139]. Le web sémantique est une approche permettant d'interconnecter des données exprimées dans un format standard,

accessible et gérable par des outils automatisés, en particulier sur internet : OWL (Ontology Web Language). Ce dernier est un langage de représentation des connaissances développé pour le Web sémantique, qui permet de décrire et représenter un domaine de connaissances à l'aide d'ontologies. Les principales composantes du web sémantique sont :

- RDF (Resource Description Framework), un modèle pour représenter des données sur le web,
- OWL (Ontology Web Language), le langage d'ontologie du Web, un langage normalisé pour spécifier les ontologies,
- SPARQL (Protocol and RDF Query Language), un langage de requêtes dédié au format RDF,
- Linked Data, une méthode de publication des données structurées sur le Web [32] pour assurer leur mise en relation et leur exploitation à travers des requêtes sémantiques.

L'objectif essentiel des travaux portant sur le lien entre IFC et Web sémantique est de développer une extension ontologique à l'IFC [119], dans laquelle les modèles IFC sont convertis en graphes RDF et la sémantique des éléments des modèles IFC peut être précisée à l'aide d'annotations RDF [118].

Dans ce cadre, certaines études ciblent l'intégration des ontologies avec le BIM. Par exemple, Venugopal et al. [119] se positionnent dans le domaine de l'industrie du béton préfabriqué et proposent une approche dont l'objectif est d'utiliser les ontologies pour rendre les définitions de l'IFC plus formelles et cohérentes. Des études de cas sont élaborées illustrant l'échange d'un modèle de fabrication entre l'architecte et l'ingénieur.

Dans le même contexte, Yang et Zhang [133] proposent des extensions à l'IFC pour réaliser une projection vers des ontologies et améliorer l'interopérabilité sémantique des modèles BIM. Un ensemble de méthodes sont proposées pour améliorer la représentation des données du bâtiment à l'aide d'objets compatibles avec l'IFC, et permettre l'extension du standard avec un complément d'information et des annotations sémantiques. Dans le même esprit, Si et Wang [112] proposent la construction d'une ontologie architecturale fondée sur l'IFC. Avec des objectifs applicatifs plus ciblés, Zarli et al. [135] proposent une approche de vérification de la conformité aux réglementations dans la construction basée sur l'IFC et une ontologie dédiée. Pour cela, un modèle dédié basé sur RDF, sémantiquement enrichi, a été développé [13]. Dans le même but, Dibley et al. [53] proposent un environnement (OntoFM) pour faciliter le suivi de la construction en temps réel, basé sur l'IFC associé à une ontologie dédiée.

De plus en plus de projets utilisent les technologies RDF et OWL pour ajouter des fonctionnalités de gestion des connaissances [118] aux modèles IFC. C'est le cas du projet SWOP [35], dans lequel le Web sémantique est utilisé pour modéliser les produits à développer et à configurer. Également, le modèle de gestion de l'établissement Sydney Opera House, d'après Schevers et al. [110], s'appuie sur la conversion d'un modèle IFC en ontologie OWL à l'aide d'un convertisseur IFC-OWL [109]. Beetz et al. [109] proposent aussi la conversion du schéma EXPRESS vers une ontologie OWL appelée ifcOWL.

Des études supplémentaires visent à l'intégration des ontologies avec le BIM [81], [88], [119], [138]. Par exemple, Abanda et al. [12], mettent en évidence les faiblesses de l'IFC, de gbXML et de COBie, et montrent les avantages de l'utilisation du web sémantique. Ils explorent également les relations entre Linked Data et la modélisation des données du bâtiment.

Aujourd'hui, plusieurs convertisseurs open source pour les formats du Web sémantique sont disponibles. Par exemple, XSD2OWL [11] permet la transformation d'un schéma XML en une ontologie OWL et XML2RDF [10] prend en charge la transformation de XML en RDF (projet ReDeFer [7]). Des convertisseurs sont également développés pour transformer la norme IFC en une ontologie RDF ou OWL [102].

II.3. Synthèse et définition de nos orientations de recherche

Pour résumer cette section, l'enrichissement du BIM IFC peut être réalisé de deux façons complémentaires. Soit en étendant l'IFC, ce qui peut se faire en modifiant le standard – ce qui peut être long et coûteux – ou en s'appuyant sur des mécanismes d'extension natifs (approche plus populaire). Soit en enrichissant la sémantique du modèle, ce qui peut se faire à l'aide de mécanismes standards (IFD) ou en réalisant un lien avec des langages du web sémantique (en particulier les ontologies).

Le tableau 4 présente un résumé des différentes approches évaluées, en détaillant les sous-catégories de solutions et en exposant leurs avantages et inconvénients.

	Approches d'extension et d'enrichissement de l'IFC			
	Extension du modèle		Enrichissement sémantique du modèle	
	Evolution du modèle	Extension du modèle	IFD	Ontologie
	Ajout de nouveaux concepts (Objet, Relation, Attribut)	Utilisation de concepts existants	Utilisation de la librairie IFD en complément à IFC	Par la conversion et l'enrichissement du modèle IFC en utilisant les technologies du web sémantique
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Efficace à mettre en œuvre • Solution durable • Plus d'impact 	<ul style="list-style-type: none"> • Facile et rapide à implémenter • Largement utilisée • Pas de changement du modèle 	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-langage • Sémantisation à l'aide de concepts et description textuelle • Conformité au standard 	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs convertisseurs existent • Expressivité limitée (pas de règles) • Haute expressivité
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Difficulté • Temps de mise en œuvre • Modèles complexes 	<ul style="list-style-type: none"> • Localité de l'extension (ex: import/export outil de CAO) • Pas de sémantique 	<ul style="list-style-type: none"> • Enrichissement seul (pas d'extension) 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de développement • Maintenance de l'outillage
Etat de l'art en lien	<ul style="list-style-type: none"> • buildingSMART 	<ul style="list-style-type: none"> • Liebich (2012) • Yang & Zhang • Yang (2003) • Froese (2003) • Robert et al. (2012) • Liu & Zhang (2012) • buildingSMART 	<ul style="list-style-type: none"> • buildingSMART initiative • Mahdavi et al. (2008) • Zhang & Lin (2012) 	<ul style="list-style-type: none"> • Beetz (2009) • Zhang & Isse (2011) • Yurchyshyna & Zarli (2009) • El Mekawy (2010) • Venegopal (2012) • Si & Wang (2012)

Tableau 4 : Les approches d'extension et d'enrichissement de l'IFC.

Nous avons examiné la première approche, basées sur le modèle IFC et ses mécanismes d'extension. Deux options principales sont disponibles : l'extension de la norme elle-même, ou bien l'utilisation de mécanismes d'extension standardisés. L'évolution de la norme est une solution efficace et durable, mais c'est un processus lourd, fastidieux et qui conduit à générer des modèles complexes. L'extension du modèle de données en utilisant les interfaces existantes dans le modèle offre elle, plus de souplesse. Cette solution est simple et rapide à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'évolution du standard. Cette solution est largement utilisée, en particulier l'extension à l'aide de PropertySet, qui, comme nous l'avons vu à travers plusieurs exemples, est particulièrement populaire. Cependant, l'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'elle n'améliore pas la précision sémantique. Un autre inconvénient est que l'extension réalisée est locale, n'est pas intégrée au standard, et donc ne sera donc pas prise en compte par les logiciels tiers.

Afin de remédier aux insuffisances sémantiques de l'IFC, de nombreuses approches visent à l'enrichissement sémantique de l'IFC. Dans ce contexte, buildingSMART fournit l'IFD comme une bibliothèque de référence pour compléter le modèle IFC et améliorer la sémantique de l'information partagée.

Pour améliorer la sémantique de l'IFC, de nombreuses recherches préconisent également la conversion du modèle IFC vers un langage d'ontologie. L'avantage de cette proposition est la flexibilité accrue des langages du web sémantique, comme RDF et OWL, qui sont plus expressifs que le langage EXPRESS. En outre, de nombreux outils de conversion sont déjà implémentés : un service de conversion de l'IFC vers RDF est disponible [94], [102] ainsi que les règles de conversion de l'EXPRESS vers OWL. D'autres outils de conversion existent également, tels que E-OWL qui est l'implémentation sémantique du modèle de donnée du moteur de simulation EnergyPlus [87].

Nous pouvons remarquer à travers les multiples exemples vus précédemment, que l'utilisation de l'extension du web sémantique est la solution la plus populaire, malgré ses inconvénients. Le principal problème est le temps considérable nécessaire à la conversion de l'IFC vers un langage d'ontologie et la nécessité de maintenir et de faire évoluer les outils de conversion en fonction des évolutions du standard IFC.

En ce qui concerne les travaux de thèse présentés dans ce manuscrit, notre optique est de ne pas impacter le modèle IFC, afin de ne pas l'alourdir, mais plutôt de chercher à en extraire l'information d'intérêt pour le domaine d'application visé. Notre proposition comprend également l'utilisation d'un modèle intermédiaire dédié au domaine d'application, instancié à l'aide de l'information issue de l'IFC. C'est dans ce modèle intermédiaire qu'il sera possible d'ajouter les extensions nécessaires à la modélisation de l'information requise par le domaine d'application (dans notre cas, la simulation

énergétique). On pourra se référer au chapitre 4 pour plus d'informations sur ce modèle intermédiaire.

Notre problématique n'est donc pas d'étendre l'IFC, mais de le mettre en correspondance, de la façon la plus efficace possible, avec des modèles de données tiers. Pour cela, il est nécessaire de mener une analyse des exigences en lien avec le(s) domaine(s) d'application visé(s) et d'étudier les échanges de données nécessaires pour aller du BIM IFC vers ce(s) domaine(s). Or, l'IFC donne uniquement la spécification d'un modèle de données et de formats d'échange – aucune méthodologie n'est fournie pour son utilisation ; et le standard n'apporte aucune aide sur la réalisation de correspondances avec des modèles de données tiers. Il nous a donc paru nécessaire de mener une analyse complémentaire sur ce point, afin de disposer d'une approche structurée pour la description du processus multi-acteurs de transition depuis l'IFC vers le domaine d'application. Cette problématique est développée dans la section suivante.

III. Outils pour la spécification des processus de transmission et de transformation de l'information de conception

Comme mentionné précédemment, un élément fondamental dans les approches de conception basées sur le BIM est la collaboration entre les partenaires du projet à l'aide du partage de l'information numérique. Ce partage d'information devrait idéalement suivre un processus d'échange bien documenté – ce qui est rarement le cas. Le processus d'échange devrait décrire essentiellement les activités réalisées, les acteurs impliqués, et les échanges d'information opérés.

Afin de faciliter la spécification et la mise en œuvre des processus, et toujours dans le but d'améliorer l'interopérabilité en conception à l'aide du BIM, buildingSMART propose deux outils dédiés : L'IDM (Information Delivery Manual) et le MVD (Model View Définition). L'IDM et le MVD sont deux outils complémentaires qui permettent respectivement de spécifier la façon dont les échanges de données entre différentes applications sont effectués et de définir une vue spécialisée d'un modèle IFC. Là où les approches présentées dans la section précédente visent l'extension ou l'enrichissement de l'IFC, l'IDM et le MVD ont pour but de faciliter la mise en lien de l'IFC avec des modèles de données tiers. Ces outils sont donc parfaitement complémentaires des mécanismes d'extension et d'enrichissement de l'IFC.

Nous en donnons une définition rapide dans ce qui suit, avant de décrire leur mise en application dans le chapitre 3.

III.1. Information Delivery Manual (IDM)

Un IDM est une cartographie d'un processus et des échanges d'information au sein de ce processus [BuildingSMART.org]. Un IDM donne les spécifications détaillées (teneur, séquençement) des activités réalisées par chaque acteur du processus et met en exergue les échanges d'information réalisés entre les acteurs durant chaque phase.

L'IDM permet de documenter la structure et l'échange d'informations entre les différents domaines. Il précise les acteurs concernés, les informations qui sont nécessaires et le moment où elles doivent être échangées. L'IDM inclut en particulier la définition d'une « Process Map » décrivant les interactions entre acteurs.

Les échanges d'information proprement dits sont modélisés dans un ensemble d'ERs (Exchange Requirements) qui contiennent les informations à échanger et leur mise en correspondance. L'ensemble des ER constitue un « Exchange Requirement Model ».

III.2. Model View Definition (MVD)

Un Model View Définition (MVD) est un sous-ensemble (ou vue) du schéma IFC dédié à un domaine d'application précis. Il définit les entités IFC et les attributs d'intérêt, pour le scénario d'échange considéré.

Un MVD va traduire les *Exchange Requirements* issus de la définition de l'IDM en exigences s'appliquant à l'extraction d'information de l'IFC.

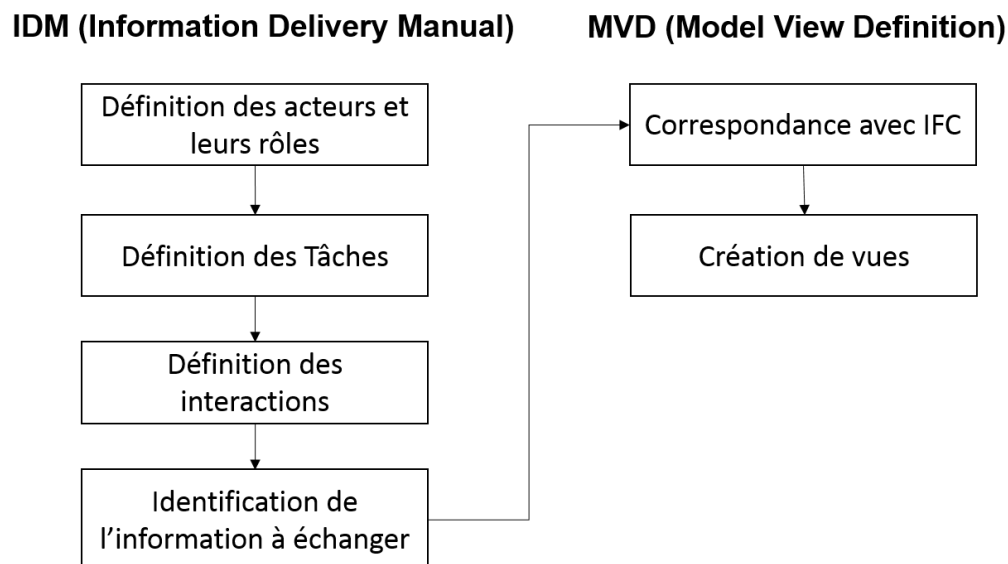


Figure 7 : La complémentarité de l'IDM et du MVD.

La figure 7 décrit la combinaison des outils IDM et MVD de façon schématique, ainsi que leur complémentarité. Dans l'IDM, la première étape consiste en la définition des acteurs et leurs rôles; une fois les acteurs définis, on spécifie leurs activités. Cela conduira à l'extraction des interactions et l'identification de l'ensemble des *Exchange Requirements* (ERs). Un ER décrit tous les détails et les exigences pour garantir un échange valide. Ensuite, le processus MVD définit les vues extraites du modèle IFC qui répondent aux besoins de l'utilisateur.

Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes penchés sur la question de l'interopérabilité en conception du bâtiment. Nous avons vu que le BIM pouvait être le principal vecteur de l'interopérabilité mais qu'il devait, pour que son impact soit réel, s'appuyer sur un format neutre et ouvert : les Industry Foundation Classes du consortium buildingSMART. Nous avons également vu que l'IFC, langage de conception généraliste, présentait des limites sur deux points : la couverture des concepts de domaines d'application spécifiques, et la précision sémantique. Ces faiblesses peuvent être atténuées à l'aide des approches d'extension et d'enrichissement du modèle de données IFC, que nous avons décrites.

Mais la solution la plus prometteuse pour la réalisation d'une connexion entre l'IFC et un domaine tiers (la simulation énergétique) serait de s'appuyer sur des outils permettant de structurer et spécifier la correspondance entre l'IFC et les domaines d'application spécifiques. De tels outils existent : ce sont l'Information Delivery Manual (IDM) et le Model View Definition (MVD) de buildingSMART, qui permettent de spécifier précisément les processus et les échanges d'information. En s'appuyant sur ces outils, on va éviter d'alourdir le modèle IFC (par son extension ou son enrichissement), tout en permettant sa connexion à des modèles de données tiers. C'est l'orientation que nous avons suivie et que nous développons dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 Environnement méthodologique pour l'interopérabilité du BIM : application à la simulation énergétique

Sommaire

I. BIM pour la simulation énergétique : état de l'art et limites	37
I.1. Connecter le BIM et la simulation énergétique du bâtiment : une question complexe	37
I.2. IFC et gbXML, des formats d'échanges pour la simulation	39
I.3. Utilisation du BIM pour la simulation : état de l'art	40
I.4. Discussion et orientation	43
II. Application de la méthodologie IDM et construction d'un MVD pour la simulation énergétique	45
II.1. Applications de l'IDM dans la conception numérique du bâtiment	45
II.2. Application de l'IDM à la modélisation de la connexion IFC-COMETH	46
II.2.1. Définition du processus	47
II.2.2. Etablissement de la Process map	47
II.2.3. Définition des « Exchange Requirement »	50
II.2.4. Etablissement du tableau des Exchanges Requirements	51
II.3. Mapping vers l'IFC, Etablissement de la MVD	52
Conclusion	54

Le Building Information Model, en tant que modèle partagé reliant divers secteurs d'activité, doit faciliter l'interopérabilité. Il doit permettre les échanges entre modèles (homogènes ou hétérogènes) durant le cycle de vie du bâtiment, et en particulier en phase de conception où l'information numérique est le principal support des échanges entre acteurs. Afin de réaliser cette vision et d'assurer la fluidité de la transmission d'information, nous avons vu dans les chapitres précédents qu'il est nécessaire de se baser sur des modèles et des formats de données standards, qui jouent un rôle de pivot entre les outils et acteurs impliqués. Ce constat s'applique en particulier à l'IFC qui constitue le standard de référence du BIM. Ceci est également illustré par la richesse de l'état de l'art sur la question de l'extension et l'enrichissement de l'IFC pour son application à des domaines spécifiques, ou pour améliorer sa sémantique. Nous avons également vu qu'il était possible de mettre en relation l'IFC avec des modèles de données externes et avons sur ce point identifié deux outils proposés par le consortium buildingSMART : l'IDM et le MVD, qui permettent respectivement de spécifier les processus et échanges de données, et de définir des sous-ensembles de l'IFC dédiés à des domaines spécifiques.

On rappelle également le constat qui sous-tend ce travail de thèse : parmi les activités réalisées dans un processus de conception basé sur les outils numériques, la simulation énergétique en est une de premier plan ; et réaliser une connexion fiable et (au moins en partie) automatisée entre le BIM et la simulation apporterait des bénéfices certains. Ceci réduirait considérablement le temps nécessaire à la construction des modèles de simulation, garantirait la conformité des données de simulation à celles de la maquette numérique et faciliterait les échanges entre acteurs de la conception et améliorerait le support décisionnel apporté par la simulation.

En lien avec l'état de l'art présenté dans le chapitre précédent et les motivations présentées en introduction de ce document, nous allons à présent développer une première contribution portant sur la mise en œuvre des environnements IDM et MVD de buildingSMART pour la spécification fine de l'interconnexion entre le BIM (format IFC) et la simulation énergétique.

Ce chapitre se divise en deux sections. Dans un premier temps, nous détaillons l'état de l'art relatif à la réalisation de connexions entre BIM et simulation énergétique. Nous en pointons les limites et argumentons la nécessité d'une meilleure structuration méthodologique du processus de traduction BIM – simulation. Nous évaluons ensuite l'adéquation des outils IDM et MVD pour la spécification de ce processus à travers une application.

I. BIM pour la simulation énergétique : état de l'art et limites

Les pratiques actuelles d'analyse de performance des bâtiments reposent beaucoup sur les technologies BIM. Néanmoins, il subsiste des problèmes d'interopérabilité qui entravent le lien entre les outils BIM et les outils pour la simulation énergétique. Pour bénéficier pleinement du potentiel du BIM en simulation et la prise de décision en conception, des approches doivent être mises au point pour permettre une transformation fiable et transparente des informations de la conception numérique du bâtiment vers les fichiers d'entrée des environnements de simulation. Cela se traduirait par des avantages significatifs, tant sur le rapport coût-efficacité (l'analyse est effectuée plus efficacement) que sur la fiabilité (les modèles de simulation sont conformes aux modèles de conception).

L'IFC se focalise essentiellement sur la géométrie du bâtiment. La version nouvellement développée de l'IFC (2x4) a ajouté plus de paramètres, en particulier pour les propriétés des systèmes de CVC (Chauffage, Ventilation et Climatisation). Néanmoins, malgré cet ajout de données supplémentaires, le standard ne répond pas encore entièrement aux exigences des outils de simulation [106]. D'autres formats spécialisés, comme gbXML [108], se concentrent sur la géométrie et la définition des zones thermiques, mais fournissent peu de données HVAC et n'assurent pas une compatibilité élargie avec les outils de simulation [48]. De façon générale, les formats d'échange disponibles ne couvrent pas l'ensemble des besoins des outils de simulation [95]. Nous développons ce point dans la suite, en mettant tout d'abord en avant la complexité de l'enjeu, puis en donnant un aperçu des capacités actuelles des outils en termes de compatibilité aux formats d'échanges standards les plus répandus, enfin, en décrivant les travaux de recherche réalisés sur l'amélioration de la connexion BIM – simulation énergétique.

I.1. Connecter le BIM et la simulation énergétique du bâtiment : une question complexe

Les outils de simulation thermique du bâtiment estiment la performance thermique d'un bâtiment donné et le confort thermique de ses occupants. De nombreuses données d'entrée sont nécessaires à la simulation thermique: la géométrie de la construction, la configuration des espaces (surfaces et volumes), le regroupement des pièces dans des zones thermiquement homogènes, l'orientation de la construction, les propriétés thermiques de tous les éléments de construction, les charges internes, l'éclairage, les scénarios d'occupation, ainsi que les caractéristiques des équipements, de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC), et les données météorologiques. La précision du résultat de la simulation thermique est conditionnée par la validité des données d'entrée, il est donc important de s'assurer de leur fiabilité.

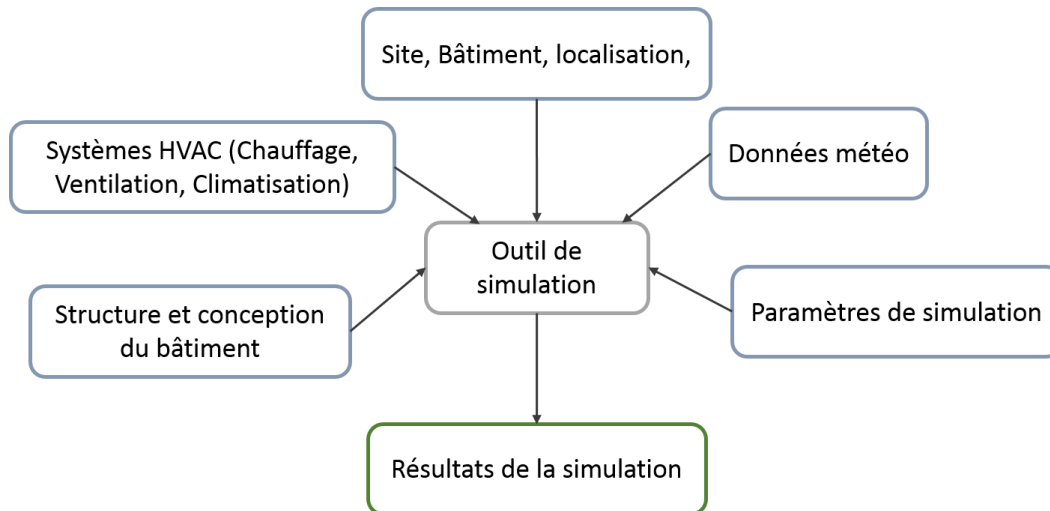


Figure 8 : Eléments en entrée et en sortie des moteurs de simulation thermique.

La plupart des logiciels de simulation thermique se basent sur un moteur de simulation, intégrant une représentation numérique des modèles physiques qui gouvernent le comportement énergétique du bâtiment. De façon schématique, le moteur de simulation prend en entrée des fichiers de configuration (qui contiennent les caractéristiques du bâtiment et de ses systèmes ainsi que les paramètres de configuration de la simulation) et génère en sortie les résultats de la simulation sous la forme d'un ou plusieurs fichiers [24] (Figure 8). Naturellement les formats des fichiers d'entrée et de sortie sont propres au moteur de simulation considéré.

La multiplicité et le degré de détail des données nécessaires à la configuration et à l'exécution de la simulation rendent la construction de l'information de simulation particulièrement complexe. Ces activités sont d'ailleurs considérées comme expertes et réalisées par des bureaux d'études dédiés sur la base de l'information architecturale et des objectifs de performances. On comprend en particulier pourquoi les simulations peuvent donner des résultats différents de ceux constatés une fois le bâtiment construit : les défauts de construction constituent une partie de la cause, mais la dégradation de l'information entre la simulation et les modèles CAO a également une influence importante.

Comment remédier à ce problème ? L'état de l'art met en avant deux approches afin de rendre l'échange d'information fiable et simple :

- la première, évoquée en section I.2 vise à étendre les capacités d'import et d'export des logiciels de simulation afin que ces derniers soient en mesure de « comprendre » les formats des applications les plus couramment utilisées en conception ;

- la deuxième porte sur la réalisation de passerelles dédiées entre le monde de la CAO et de la simulation. Nous présentons l'état de l'art en lien en section I.3.

I.2. IFC et gbXML, des formats d'échanges pour la simulation

Un point positif est que le nombre d'outils de simulation compatibles avec l'IFC ne cesse de grandir. Le site buildingSMART [97] fournit par exemple une liste de logiciels pour le domaine de l'AEC compatibles avec l'IFC. Sur la base de ce recensement et de notre état de l'art, nous proposons le tableau 5 qui donne un aperçu des capacités d'import et d'export d'IFC ou d'autres formats d'échange de plusieurs outils de simulation énergétique d'utilisation courante.

Outils	Import BIM	Export BIM	Interface utilisateur	Site Web
IDA ICE	IFC, DWG, DXF	Aucun	Oui	http://www.equa-solutions.co.uk/
RIUSKA	IFC	IFC	Oui	http://www.granlund.fi/en/services/granlund-software-applications/riuska/
Simergy (EnergyPlus)	IFC, gbXML	Aucun	Non	http://simergy.lbl.gov/index.html
OpenStudio	IFC, gbXML	Aucun	Oui	https://www.openstudio.net
IES-VE	IFC, gbXML, DXF	Aucun	Oui	http://www.iesve.com/software

Tableau 5 : Outils de simulation compatibles avec les formats d'échange du BIM.

On constate que, pour assurer l'interopérabilité entre les modèles BIM et ceux de simulation, les deux formats de données de référence sont l'IFC et gbXML. Dans l'échantillon du tableau, on voit que l'IFC est proposé en import par les cinq outils de simulation, et en export par un outil. De son côté, gbXML est proposé en import par trois de ces outils. En quoi l'IFC et GbXML se différencient-ils ? Sur la base de notre état de l'art, en particulier des analyses proposées par Huang et al. [24] et Bahar et al. [25], nous proposons la synthèse qui suit.

GbXML (Green Building XML) est un format conçu dans le but de faciliter la conception de bâtiments écologiques et respectueux de l'environnement. Il permet la description de la géométrie du bâtiment et des propriétés pertinentes pour la simulation énergétique, visant ainsi à faciliter les échanges de données entre les modèles de conception et les outils d'analyse énergétique. Le format, basé sur XML, est structuré, les données de conception sont stockées selon différents niveaux de détail. Ce format permet également de spécifier les propriétés et les caractéristiques de l'environnement du bâtiment, permettant ainsi de bien prendre en considération au-delà du bâtiment lui-même, les éléments pouvant influencer sur le comportement énergétique du bâtiment.

L'IFC est devenu le modèle de données de référence dans l'industrie de l'AEC. Développé par buildingSMART, il a été maintenu ouvert et libre, et à notre connaissance il est actuellement le seul format ouvert mis en œuvre de façon étendue par les outils de CAO. Il a été spécifié dans le but de jouer un rôle pivot dans le cycle de vie du bâtiment, et de permettre en particulier l'échange de données et l'interopérabilité entre les outils. Compte tenu de son paradigme orienté objet, qui permet de représenter tous les éléments d'un bâtiment comme des objets avec des propriétés et des références à d'autres objets, le format IFC peut être facilement géré et compris par les outils logiciels.

L'IFC et gbXML ont un impact positif sur l'interopérabilité des données dans les projets de construction, comme le montre une enquête de Bahar et al. [25]. Cette enquête décrit le niveau d'interopérabilité entre les outils, en spécifiant les formats en entrée et en sortie de chaque outil étudié. Elle montre des limites persistantes et que les formats les plus couramment utilisés sont l'IFC et gbXML. Tout d'abord, la fiabilité des imports et d'exports (en se basant sur le même outil) reste faible. Ensuite, certaines parties des modèles restent peu couvertes : par exemple, aucune application ne prend en charge les systèmes HVAC et leurs propriétés [95]. C'est en particulier le cas de l'IFC, qui ne permet pas l'expression de toutes les propriétés des systèmes HVAC, ce qui représente un obstacle pour son adoption dans le domaine de la simulation énergétique. Il est à noter que même la version la plus récente de l'IFC (IFC4), n'a pas encore surmonté cette limite [106].

I.3. Utilisation du BIM pour la simulation : état de l'art

Le rôle central du BIM dans l'analyse du comportement énergétique est généralement reconnu, et la question de l'interopérabilité entre les modèles BIM et la simulation énergétique est considérée comme un défi majeur. Ce constat est confirmé par Laine et al. [80], dans lequel ils démontrent par exemple les bénéfices de l'utilisation du BIM pour la simulation de l'énergie thermique. Cette opinion est partagée par Bazjanac [29], qui prône l'utilisation du modèle standard National Building Information (NBIMS) dans la simulation de performance énergétique. Également, dans une étude plus récente Bavastro et al. [26], mettent l'accent sur l'importance des échanges entre les modèles 3D et le modèle d'analyse et leur impact sur le besoin en énergie.

Par ailleurs, les fonctionnalités et performances des outils de simulation ont fait l'objet d'analyses approfondies et de comparatifs qui montrent l'importance et la diversité de l'offre en lien. Ceci est illustré par l'étude [18], où une évaluation est menée en fonction de cinq critères : la convivialité, l'intelligence, l'exactitude, l'interopérabilité et les processus d'adaptation. Dix outils (HEED, eQuest, Energy-10, Vasari, Solar Shoebox, OpenStudio, VE-Ware, ECOTECT, DesignBuilder, BEopt) sont passés en revue dans cette étude. D'après cette dernière, il est nécessaire d'améliorer les outils existants pour les rendre plus performants. Egalement, les développeurs d'outils devraient fournir des outils mieux adaptés aux besoins des architectes. On peut citer également une autre étude [90] qui porte sur une analyse comparative de DOE-2 et du simulateur thermique EnergyPlus, ainsi que certaines de leurs interfaces utilisateur. Elle montre que les interfaces utilisateur pour DOE-2 sont actuellement plus développées par rapport aux interfaces pour EnergyPlus. D'après cette étude, l'absence d'interface utilisateur complète et conviviale rend la réalisation d'une simulation de performance énergétique du bâtiment plus difficile dans la pratique.

L'importance de l'offre en simulation énergétique et la reconnaissance des bénéfices générés par l'utilisation du BIM ont naturellement généré un fort intérêt pour la question de l'interopérabilité entre le BIM et les outils de simulation. Par exemple, l'article [93] propose une évaluation de l'interopérabilité entre un modèle BIM et différents outils de simulation d'énergie tels qu'EnergyPlus, eQUEST, Ecotect et IES <VE>. L'accent est mis sur le format d'échange gbXML qui englobe la géométrie, la composition de l'espace, la construction, la charge interne et les systèmes HVAC. L'étude montre que tous ces outils affichent une compatibilité avec le BIM, à travers le format gbXML, mais que cette compatibilité est mise en œuvre de façon extrêmement variable. On constate notamment des limites sur la couverture de l'information modélisée dans le BIM (limites en partie liées aux caractéristiques propres du format gbXML) mais également une qualité contrastée de l'import d'information. L'étude propose également quelques suggestions visant à améliorer l'interopérabilité avec les outils de simulation sélectionnés, comme le développement d'une interface entre le modèle BIM et les outils d'analyse.

Parmi les outils de simulation, EnergyPlus [98] est l'un des environnements les plus populaires et de nombreux travaux de recherche visent à améliorer la liaison entre EnergyPlus et le BIM. Dans ce cadre, on peut en particulier citer le travail de Bazjanac et Maile [30], qui vise à développer une interface pour la description des systèmes HVAC en IFC, en vue d'une connexion IFC-EnergyPlus améliorée. Cette interface repose sur des ensembles de propriétés IFC (PropertySets) qui permettent de définir une correspondance entre les données d'entrée d'EnergyPlus et les données contenues dans le BIM IFC. Nous pouvons également mentionner le travail de O'Sullivan et al. [100] qui proposent une interface graphique autonome compatible avec EnergyPlus et le BIM. Cette interface rend la simulation plus conviviale et rapide pour l'ingénieur en conception du bâtiment. Dans

le même contexte, Hitchcock et al. [65] proposent une transformation de l'IFC à EnergyPlus, en soulignant le fait que les modèles IFC doivent être enrichis pour permettre la génération de modèles de simulation énergétique complets. En outre, le projet Simergy [96] aborde la relation de BIM à BEM (Building Energy Model, un modèle dédié à la modélisation des aspects énergétiques) et la transformation grâce à un processus de mapping entre ArchiCAD (outil de CAO) et EnergyPlus.

Avec des objectifs plus larges que la connexion point à point entre le BIM et un outil de simulation, d'autres études traitent de façon générale de l'interopérabilité entre le BIM et la simulation. C'est le cas de Kim et al. [77] qui proposent le développement d'une bibliothèque Modelica pour Building Information Modeling (BIM) afin d'effectuer la simulation énergétique des bâtiments. Modelica est un langage déclaratif de haut niveau pour décrire le comportement mathématique. Il est généralement appliqué à des systèmes d'ingénierie et peut être facilement utilisé pour décrire le comportement de différents types de composants d'ingénierie. Ces composants peuvent être combinés dans des sous-systèmes, des systèmes, voire des architectures [5]. Dans le même esprit, Yan et al. [131] proposent d'améliorer le lien entre le BIM avec la modélisation thermique et l'éclairage naturel à travers la création de deux prototypes : Revit2Modelica pour la simulation thermique et Revit2Radiance pour la simulation de l'éclairage naturel.

D'autres travaux méritent d'être mentionnés, par exemple ceux du projet EBC annexe 60 (Energy in Building and Communities program - annexe 60 Project (de 2012 à 2017)). Ce projet rassemble les contributions de près de 100 chercheurs du monde entier sur la question du processus de transformation du BIM à la simulation (BEPS pour Building Energy Performance Simulation). Ce projet traite également, de façon plus générale, de l'interopérabilité en simulation, à l'aide du langage de modélisation Modelica et du standard FMI (Functional Mockup Interface), un standard ouvert et un outil indépendant pour l'échange de modèles. Un des objectifs de ce projet est de combler l'écart entre les modèles BIM et la modélisation de l'énergie en se basant sur les bibliothèques Modelica et relier ainsi les outils de simulation des performances des bâtiments avec ces bibliothèques à travers le standard FMI.

Sur la question de la connexion entre BIM et simulation, Modelica semble faire l'objet d'un intérêt soutenu. La force du langage de simulation Modelica réside notamment dans une communauté d'utilisateurs importante et en constante croissance, qui accroît en permanence l'offre (i.e. les bibliothèques d'éléments de modélisation et les environnements logiciels en lien) du langage. Nous pouvons par exemple mentionner les travaux de Cao et al. [46] et Wimmer et al. [129] proposant une transformation du modèle du BIM IFC vers Modelica, en mettant l'accent sur la conversion des modèles des systèmes HVAC.

D'autres travaux de recherche sont focalisés principalement sur le traitement de la géométrie du bâtiment en proposant des algorithmes et traitements pour générer de l'information nécessaire à la simulation depuis le BIM, par exemple ceux de Van Treeck et al. [124].

I.4. Discussion et orientation

Pour mettre en œuvre un échange de données, plusieurs obstacles doivent être pris en considération. Le premier est la nécessité d'un langage BIM normalisé commun. Le deuxième est la disponibilité de mécanismes performants et, si possible, normalisés afin de compléter et adapter le BIM pour la simulation. Le troisième est la mise à disposition d'outils logiciels pour une transformation efficace et fiable du BIM vers des modèles de simulation. Le premier obstacle est susceptible d'être surmonté grâce à la reconnaissance internationale des Industry Foundation Classes de buildingSMART (IFC), qui se sont imposées comme le format d'échange standard du BIM dans l'industrie de la construction. Cependant, concernant le deuxième obstacle, l'IFC présente encore des limites qui freinent son application dans des domaines spécifiques, comme par exemple la simulation énergétique. Cette limitation a été identifiée par buildingSMART, qui a livré de nouveaux outils méthodologiques afin de faciliter et structurer l'extension et l'enrichissement de l'IFC pour des applications spécifiques. Ces outils sont IDM (Information Delivery Manual) [14] et MVD (Model-View Définition), introduits dans le chapitre précédent. L'IDM est dédié à la caractérisation et la description de la conception des processus en mettant l'accent sur la spécification des échanges d'informations. Le MVD permet de spécifier les sous-ensembles de l'IFC, pour des utilisations spécifiques.

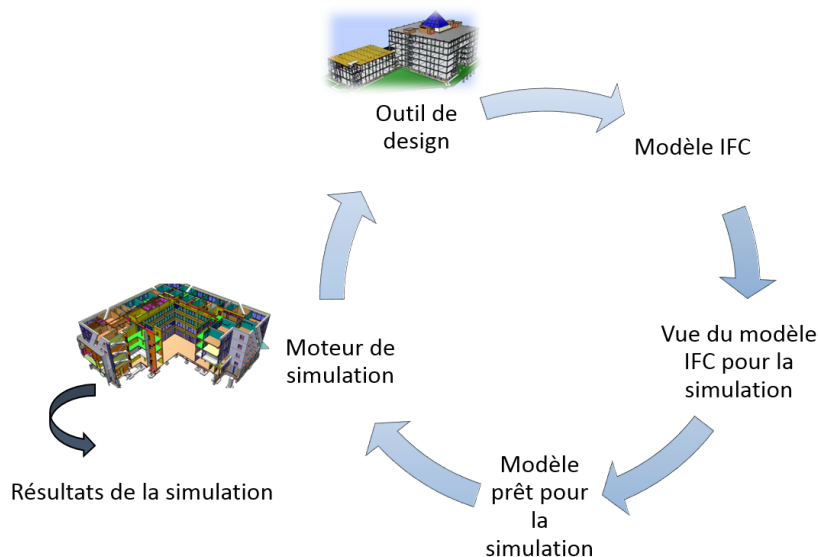


Figure 9 : De la conception à l'analyse énergétique du bâtiment.

Enfin, une fois les deux obstacles précédents traités, il est nécessaire de faire le lien entre le BIM IFC dédié à la simulation. La figure 9, illustre la procédure à suivre : l'outil de conception fournit un modèle IFC décrivant essentiellement la géométrie du bâtiment et une partie des propriétés énergétiques. Il faut ensuite extraire la partie du modèle IFC contenant les données utiles à la simulation : on parle de vue pour la simulation. Ensuite, il est nécessaire de compléter cette vue avec les informations manquantes et procéder à une conversion (transformation de modèle) pour qu'il soit interprétable par le moteur de simulation.

Comme expliqué précédemment, l'IFC combiné avec l'IDM et le MVD constitue la base la plus pertinente pour mettre en œuvre une connexion fiable entre le BIM et la simulation – ce, à condition que ces outils méthodologiques soient appuyés par un support logiciel dédié. Dans ce qui suit, nous allons décrire en détails la méthodologie IDM, et la mettre en œuvre afin de décrire le processus de transformation de l'IFC en modèle pour la simulation thermique. Sur la base de ce travail, nous spécifierons une vue de l'IFC pour la simulation thermique en nous appuyant sur le MVD.

Le moteur de simulation sur lequel nous allons appuyer notre cas d'étude (décrit plus en détails dans le chapitre 5) est appelé COMETH, pour COre for MOdelling Energy and THERmal Comfort; il a été présenté dans le chapitre 1. Développé par le CSTB, il se base sur la réglementation thermique française RT2012 (Voir annexe I sur la RT2012). Il s'agit d'un moteur de simulation thermique dynamique qui prend en entrée la description physique du bâtiment, les scénarios d'occupation, les données d'environnement et calcule l'évolution temporelle des variables d'intérêt [126] (voir tableau 6 ci-dessous).

Les données d'entrée de COMETH	Les données en sortie de COMETH
<ul style="list-style-type: none"> – Environnement extérieur : données météorologiques du site – environnement proche – Occupant : présence, température de consigne, puisage d'ECS, etc. – Bâtiment : description physique des composants – Systèmes : émission, distribution, génération, valeurs réelles des performances, performances complètes sur toute la plage de fonctionnement du système 	<ul style="list-style-type: none"> – Températures : Toutes les températures intérieures calculées à chaque pas de temps – Flux énergétiques : Tous les flux calculés (incidents, transmis au bâtiment, fournis au bâtiment, consommés, perdus), à chaque pas de temps – Débits d'air : Tous les débits d'air massiques calculés à chaque pas de temps

Tableau 6 : Les données en entrée et en sortie de COMETH.

À noter que COMETH est un outil extensible [126] : depuis sa création en 2009, il est sans cesse enrichi de nouveaux modèles. Ces derniers sont utilisés dans le cadre de la recherche et non encore intégrés à la RT2012.

II. Application de la méthodologie IDM et construction d'un MVD pour la simulation énergétique

L'un des buts de nos travaux est d'évaluer l'applicabilité et la pertinence du processus IDM/MVD pour des utilisations spécifiques en se concentrant sur l'analyse de l'énergie. À cette fin, nous allons appliquer cette méthodologie pour la mise en correspondance entre l'IFC et COMETH [17]. Ce travail est complété par la définition d'un modèle intermédiaire qui relie le modèle conceptuel de bâtiment avec le modèle de la simulation, et le prototypage d'un logiciel qui réalisera la transformation.

II.1. Applications de l'IDM dans la conception numérique du bâtiment

Dans la littérature, il existe de nombreuses applications de la méthodologie IDM/MVD. Par exemple, le projet européen HESMOS (ICT Platform for **H**olistic **E**nergy **E**fficiency **S**imulation and Lifecycle **M**anagement **O**f Public Use **F**acilities) a utilisé cette approche pour la gestion de l'énergie d'un immeuble de bureaux au cours de la phase d'exploitation [76]. Le projet propose une extension de la méthodologie IDM/MVD en fournissant d'une part un générateur de sous-schéma pour aider les modélisateurs afin de réduire le temps de développement du modèle, d'autre part une vue multi-modèles et un service de sélection d'objets dans le but de faciliter les opérations de l'utilisateur final sur le modèle.

En outre, le projet InPro [127] propose une définition basée sur l'IDM des processus d'entreprise (Business Process) centrés sur l'utilisation d'un BIM partagé, comprenant la modélisation du processus et la spécification des échanges d'information entre les différents acteurs. D'autres applications de l'IDM sont également disponibles dans [101], [125], [15]. Le premier article présente les défis rencontrés dans l'application du BIM pour la construction préfabriquée en béton et propose une application de l'IDM et du MVD à ce domaine. Le second intègre le concept MVD comme un mécanisme orienté objet et modulaire pour ajouter de la sémantique dans les vues, afin de compenser les faiblesses sémantiques de l'IFC. Dans le troisième article, une méthode progressive pour développer IDM est proposée afin d'en faciliter l'utilisation et permettre une application plus large de l'IFC.

En continuité avec ces travaux, le but de l'étude présentée dans ce chapitre est d'analyser la pertinence de l'utilisation de l'IDM à la structuration du processus de connexion BIM/simulation énergétique, à travers un cas d'application portant sur la construction de modèles d'entrée de l'outil COMETH à partir de modèles IFC.

II.2. Application de l'IDM à la modélisation de la connexion IFC-COMETH

En général, un outil de simulation de l'énergie vise à estimer le comportement énergétique d'un bâtiment avec l'objectif de fournir au concepteur toutes les informations nécessaires pour une conception du bâtiment qui offrira un confort thermique optimal. Même s'il existe de nombreux outils de simulation sur le marché, de divers types (commerciaux, gratuits, réglementaires) et reposant sur différents paradigmes, les données d'entrée nécessaires des outils de simulation pour l'analyse énergétique sont généralement, dans leur nature, similaires. Elles concernent : la structure du bâtiment (géométrie, espaces/zones thermiques, l'orientation du bâtiment, la construction, la construction de l'utilisation), les caractéristiques des systèmes HVAC [25], les données météorologiques. D'autres paramètres spécifiques, tels que la durée de la simulation, doivent être ajoutés. Les résultats de sortie comprennent généralement l'évolution thermique du bâtiment (généralement représentée par les températures des différentes zones thermiques), une estimation globale de la consommation d'énergie, et le coût monétaire relié. Ce schéma général est décrit dans la figure 10.

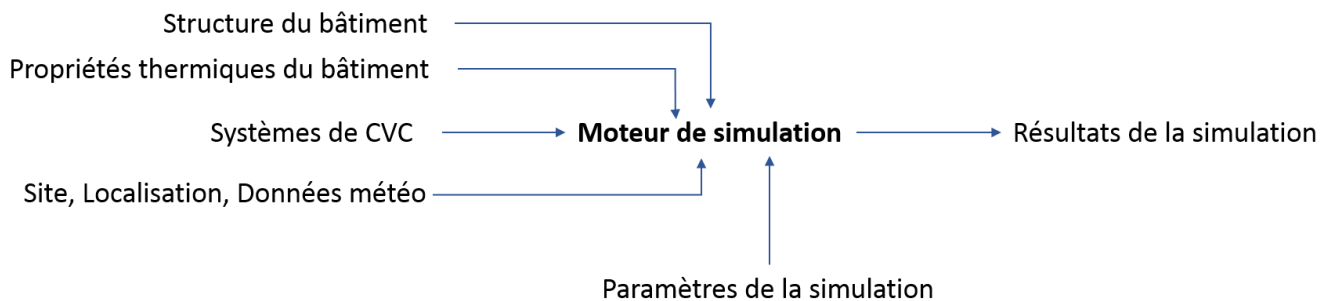


Figure 10 : Données d'entrée et sortie usuelles des moteurs de simulation.

Concernant COMETH, la modélisation du bâtiment inclut trois dimensions principales : thermique, ventilation et éclairage. Les modèles comprennent la description de l'équipement HVAC déployés dans le bâtiment, nécessaire au calcul de la consommation d'énergie du bâtiment. De façon plus précise, les modèles COMETH comprennent des éléments de construction, des éléments de distribution, éclairage, environnement extérieur, système d'émission, système de chauffage, système photovoltaïque et de ventilation.

Afin d'appliquer l'IDM à la connexion IFC - COMETH, les livrables suivants doivent être développés :

- un document définissant les participants au processus, l'information à échanger et ses formats,
- la carte de processus (process map), qui spécifie les activités et leurs liens, sur la base de modèles dédiés (langage BPMN – Business Process Modeling Notation),
- le document des exigences d'échange (Exchange Requirements), détaillant les échanges d'information ;
- établissement du tableau des Exchange Requirements comprenant les éléments à échanger et leur définition, en indiquant s'ils sont obligatoires ou optionnels.

II.2.1. Définition du processus

C'est la première étape dans l'IDM qui consiste en la mise en contexte des échanges, en définissant les acteurs qui sont en communication, leurs tâches, ainsi que les différentes interactions qui auront lieu entre eux.

II.2.2. Etablissement de la Process map

Une fois que les acteurs et leurs interactions sont extraits, l'étape suivante concerne la construction de la carte de processus (Process map). Cette dernière identifie quand les échanges ont lieu et les rôles des personnes en interaction. Pour modéliser la Process Map on utilise le BPMN (Business Process Modeling Notation), un langage pour la représentation des processus. Il existe plusieurs outils de création de diagramme BPMN, comme Bizagi [37] sélectionné ici en raison de sa facilité d'utilisation et de son ergonomie.

Les *pools* horizontales, dans le diagramme BPMN (figure 11), représentés sous la forme de couloirs, sont liées aux acteurs ou aux rôles pertinents impliqués dans les échanges. Le diagramme représente les échanges qui ont lieu entre eux et les activités qu'ils réalisent selon une progression chronologique.

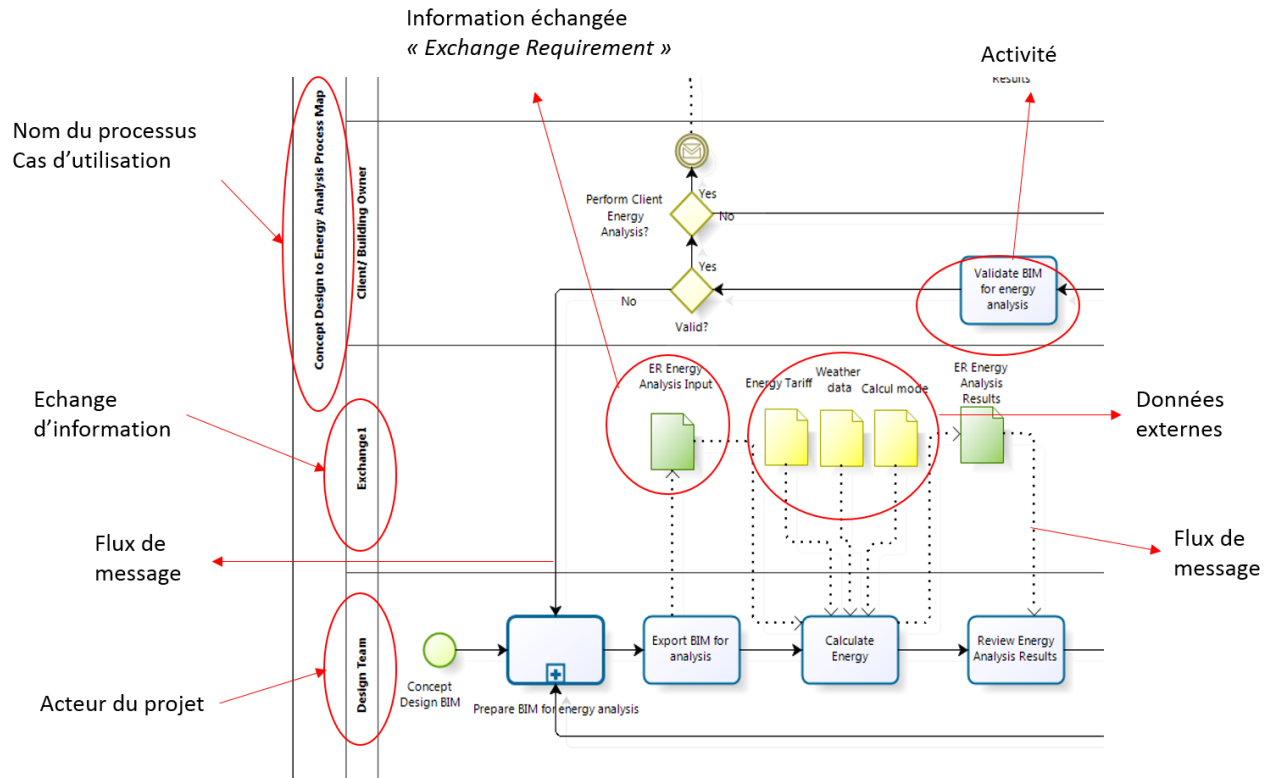


Figure 11 Modélisation de processus dans les Process Map avec le langage BPMN

On retrouve aussi la ligne « Echange » qui modélise les échanges entre les disciplines et acteurs. Au niveau de la cartographie des processus, des rectangles blancs arrondis représentent les activités réalisées par les acteurs ou les rôles. Les blocs verts dans les *pools* d'échange désignent un échange d'informations, tandis que les jaunes représentent les données externes. Les échanges de données du bâtiment, représentés par les symboles verts, sont au centre de notre intérêt.

Les flèches en pointillés indiquent les flux d'information à partir d'une activité vers un « échange » (exportation) et d'un « échange » vers l'activité de réception (importation). Les lignes pleines montrent les relations flux-de-contrôle au sein d'une même discipline.

La figure 12 montre la carte de processus que nous avons développée suivant la méthodologie décrite dans les paragraphes précédents. Nous la commentons plus loin.

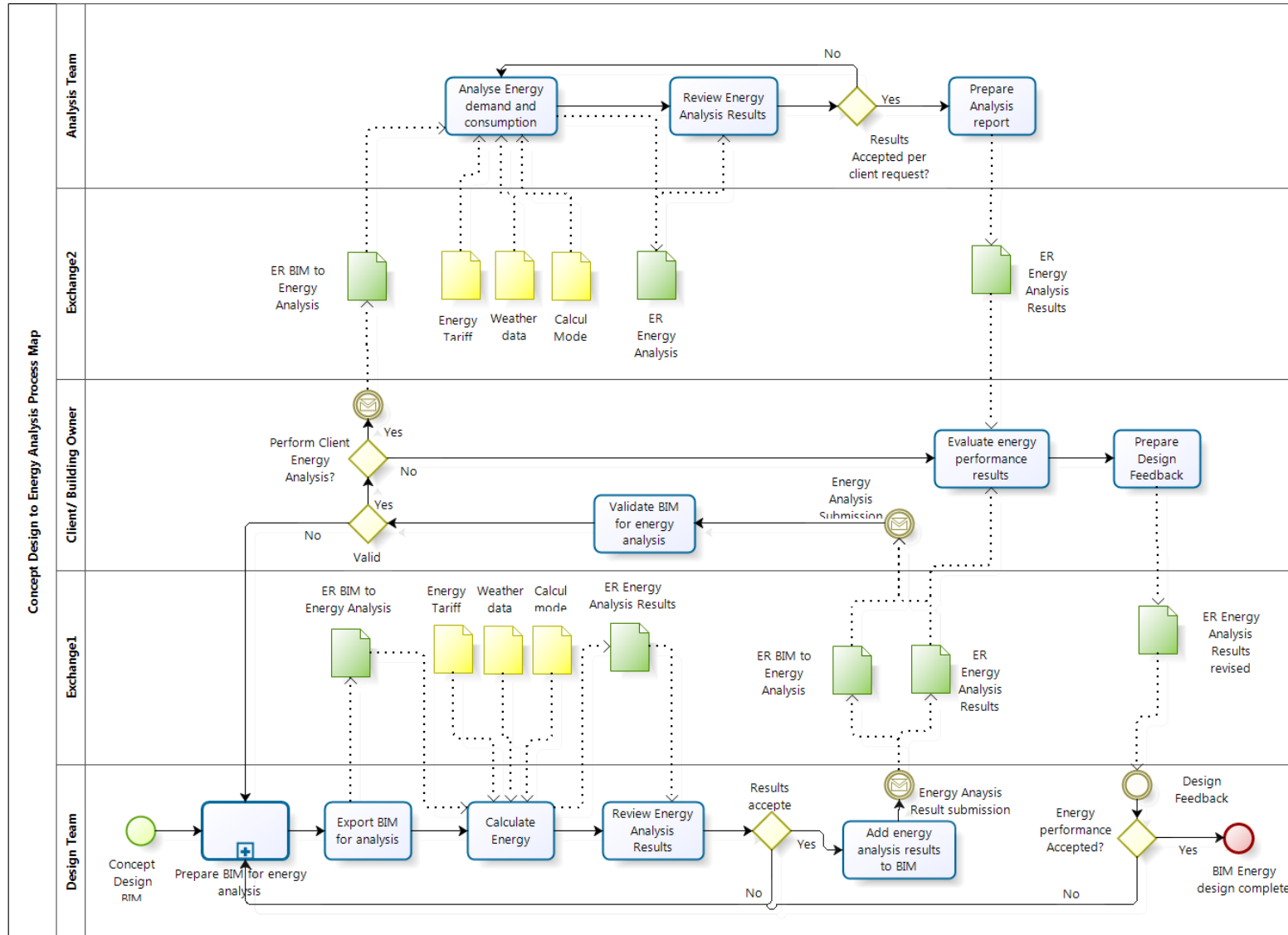


Figure 12 : Process Map - de la conception vers l'analyse énergétique.

Cette carte donne une vision schématique du processus d'analyse d'énergie. Nous pouvons distinguer sur cette figure trois acteurs : l'équipe de conception, le client et l'équipe d'analyse. Le processus commence par l'activité « BIM concept design », qui porte sur la conception complète du bâtiment (l'emplacement du site et la construction, la géométrie 3D du bâtiment) et la production du BIM. Ce modèle est ensuite transmis à un acteur approprié au sein de l'équipe de conception pour être préparé pour l'analyse énergétique (i.e. pour ajouter les informations spécifiques utiles à la simulation, par exemple les propriétés thermiques du bâtiment).

Une fois que le BIM a été préparé pour l'analyse de l'énergie, il est exporté en IFC pour effectuer la simulation énergétique. Les échanges d'information doivent être réalisés en conformité avec les *Exchange Requirements* en lien (voir section suivante). Ces derniers spécifient l'information à échanger pour assurer le passage de la conception à l'analyse énergétique. Ensuite, des transformations supplémentaires doivent avoir lieu dans le but de convertir les informations IFC vers le fichier d'entrée pour la simulation de l'énergie. A ce stade, toutes les informations nécessaires à l'analyse énergétique sont disponibles. Après la sélection du mode de calcul approprié, des données météorologiques et du tarif de l'énergie, la simulation est exécutée. L'analyse de l'énergie permettra de déterminer la demande en énergie thermique du bâtiment et les coûts associés.

Les résultats de la simulation sont obtenus et évalués par l'équipe de conception. Ils sont comparés aux objectifs énergétiques pour le projet. Si les objectifs ne sont pas atteints, le concepteur doit revenir à l'activité « Prepare BIM for Energy Analysis » et faire d'autres modifications. Une fois que l'équipe de conception est satisfaite de la conception, elle ajoutera les résultats d'analyse de l'énergie au BIM. La process Map est décrite plus en détail en annexe II.

II.2.3. Définition des « Exchange Requirement »

La deuxième étape consiste en la décomposition de l'*Exchange Requirement* « BIM to Energy Analysis » extrait de la Process Map en un ensemble d'exigences élémentaires. On obtient ainsi une spécification claire des informations attendues dans l'échange.

L'ER « BIM to Energy Analysis » vise à préparer le BIM à la simulation énergétique. Il indique que les informations nécessaires à l'analyse comprennent la géométrie du bâtiment, les matériaux, la localisation et les données climatiques. Le tableau 7 donne une synthèse des éléments nécessaires pour l'échange.

Exigences	Description
Entrée utilisateur	Structure du bâtiment, équipements, données de l'espace, Site
Structure du bâtiment	Espaces (géométrie, paramètres de l'espace), exigences thermiques, exigences en éclairages, qualité de l'air, occupation de l'espace et son usage, équipements techniques, composants opaques et transparents
Equipements, matériaux	Ventilation mécanique, système de chauffage, système d'eau chaude, système de climatisation, système d'éclairage, système photovoltaïque,
Données de l'espace	Enveloppe du bâtiment,
Site	Localisation du bâtiment, données météo, environnement, radiations solaire.

Tableau 7 : Les éléments nécessaires à l'échange (« BIM to Energy Analysis » ER).

Les exigences d'échange sont organisées comme suit :

- la structure du bâtiment: la construction d'espaces, les ponts thermiques, l'occupation de l'espace, les éléments opaques et transparents,
- les exigences énergétiques liées au bâtiment : les exigences thermiques, les exigences d'éclairage, d'aération et de ventilation naturelle,
- les équipements : ventilation mécanique, système de chauffage, système d'eau chaude, système d'éclairage, système photovoltaïque,
- le site : l'emplacement du bâtiment, l'environnement, les données météo.

II.2.4. Etablissement du tableau des Exchanges Requirements

L'étape suivante consiste en la décomposition des éléments définis dans l'étape précédente.

Systèmes COMETH	Composants
Système de chauffage	Ballon d'eau chaude, tour de refroidissement, pompes
Système de ventilation	Ventilateurs
Eléments de distribution	Pompes
Système photovoltaïque	Panneau photovoltaïque
System d'éclairage	...

Tableau 8 : Décomposition des systèmes de COMETH.

Par exemple, les équipements HVAC sont décomposés selon les entrées nécessaires dans le moteur de simulation : un système de ventilation, un système de génération de chaleur, d'éclairage et système photovoltaïque. Le tableau 8 ci-dessous propose une sélection de composants de chaque système.

Ensuite, il faut fournir la table des *Exchange Requirements*, qui détaille tous les composants utilisés pour effectuer la simulation de l'énergie et leur correspondance avec les classes correspondantes en IFC et leurs propriétés (Pset) en précisant si ce sont des éléments obligatoires ou optionnels (tableau 9). Ce tableau est un extrait du tableau des *Exchange Requirements* (voir annexe II). Cet extrait montre l'information à échanger au niveau de l'espace du bâtiment (Nom, Usage, Nombre de logements, Hauteur de l'espace), ainsi que le caractère optionnel ou obligatoire correspondant, le type et l'unité.

Type d'information	Informations requises	Obligatoire	Optionnel	Type	Unité
Espace	Nom		×	String	n/a
	Usage	×		String	n/a
	Nb_logement	×		String	n/a
	Hauteur	×		Real	m
	Zone_Hauteur	×		Real	m

Tableau 9 : Extrait du tableau des *Exchange Requirements* pour l'élément « Espace ».

II.3. Mapping vers l'IFC, Etablissement de la MVD

Le développement d'un *Exchange Requirement Model* (ERM) est la première étape de la traduction des exigences portant sur les échanges de données définies dans la *process map*. Cette étape concerne la mise en correspondance des éléments extraits dans le tableau des *exchanges requirements* avec les éléments IFC correspondants. Ceci va donner comme résultat une vue du modèle IFC, appelée MVD pour *Model View Definition* (Figure 13).

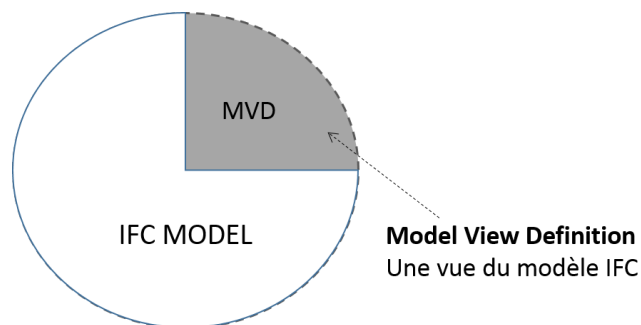


Figure 13 : Model View Definition MVD, une vue du modèle IFC.

Le tableau 10 est un résumé des éléments IFC constituant le MVD que nous avons définis (le tableau complet est donné dans l'annexe II), divisé en 3 catégories. La première concerne la géométrie comprenant le bâtiment (*IfcBuilding*), les Espaces (*IfcSpace*) et les composants opaques (*IfcWall*, *IfcSlab*, *IfcRoof*, etc.) et transparents (*IfcOpeningElement*). La deuxième catégorie décrit les exigences énergétiques du bâtiment (éclairage de l'espace, ventilation naturelle, etc.). Enfin la troisième catégorie concerne les équipements de CVC dans lesquelles on retrouve les systèmes de ventilation mécanique (*IfcFan*), d'éclairage, d'eau chaude (*IfcBoiler*) et le système photovoltaïque (*IfcSolarDevice*).

Catégorie	Eléments	Eléments IFC correspondants/ property set
Géométrie du bâtiment	Bâtiment	IfcBuilding, IfcBuilding.name + Pset_BuildingCommon
	Espaces, Occupation	IfcBuilding + Pset_BuildingCommon, occupancyType IfcSpace +Pset_SpaceOccupancyRequirements, occupancyType
	Composants opaques	IfcBuildingElement IfcWall, IfcSlab, IfcRoof, IfcColumn, IfcBeam, IfcRamp, IfcStair
	Composants transparents	IfcOpeningElement Eg. IfcDoor, IfcWindow, IfcCurtainWall
Exigences énergétiques	Exigences thermiques	IfcBuilding + Pset_SpaceThermalRequirements, AirConditioning
	Exigences en éclairage	IfcBuilding + Pset_SpaceLightingRequirements, Illuminance + Pset_SpaceLightingRequirements, ArtificialLighting
	Exigences en ventilation naturelle	IfcSpace, IfcSpatialZone, IfcZone, IfcSpaceType + Pset_SpaceThermalRequirements, NaturalVentilation IfcDistributionSystem + Pset_DistributionSystemTypeVentilation

Composants du système HVAC	Système de ventilation mécanique	IfcDistributionSystem.PredefinedType = VENTILATION IfcFan, IfcFanType + Pset_FanTypeCommon
	Système d'eau chaude (ballon d'eau chaude)	IfcBoiler, IfcBoilerType + Pset_BoilerTypeCommon IfcDistributionSystem.PredefinedType=DOMESTICHOTWATER IfcPump IfcCoolingTower, IfcCoolingTowerType
	Système d'éclairage	IfcBuilding + Pset_SpaceLightingRequirements, Illuminance
	Système photovoltaïque	IfcSolarDevice

Tableau 10 : Extrait des éléments IFC constituant le MVD analyse énergétique.

L'identification des éléments de modélisation, leur formulation et structuration dans un Model View Définition (MVD) est un travail qui nécessite une bonne connaissance de l'IFC. Dans le MVD, les éléments de modélisation sont structurés hiérarchiquement (par exemple, l'arborescence des éléments relatifs au bâtiment débute avec l'élément racine IFC *IfcBuilding*).

La portée d'un MVD peut varier considérablement selon les besoins des utilisateurs finaux, et ce au sein d'un même domaine. Dans notre cas nous l'avons strictement appliqué à la spécification du processus de transmission d'information depuis le BIM vers l'analyse des performances énergétiques d'un bâtiment.

Conclusion

Nous avons dans ce chapitre adapté deux outils méthodologiques de buildingSMART à notre problématique. En premier lieu, nous avons défini l'IDM (Information Delivery Manual) représentatif de notre application. Cet IDM nous a permis de structurer le processus de transmission de l'information et de mieux définir les éléments nécessaires à l'échange. L'IDM a également servi de base à la conception de notre MVD (Model View Definition), un sous-ensemble de l'IFC contenant les éléments nécessaires à la simulation thermique. Le MVD permet de se baser sur modèle plus léger, contenant uniquement l'information utile à l'application visée.

Toutefois, le modèle de données IFC et le MVD qui en est extrait ne permet pas de modéliser la totalité des éléments nécessaires. Il est donc nécessaire d'enrichir cette information avant d'opérer la transformation vers le format d'entrée de l'outil de simulation ciblé, dans notre cas COMETH.

Une solution, sans apporter de modifications sur le modèle IFC, consiste à recourir à l'approche du modèle pont [38], qui se base sur un modèle séparé agissant comme un pont entre le modèle BIM et de la source de données externe. Il ne nécessite pas de changements dans le schéma du BIM et les modèles externes utilisés. Dans notre cas, il visera à capturer les relations entre le modèle BIM et le modèle de simulation. Il peut donc se baser sur le MVD obtenu étant donné que ce dernier est le résultat d'une mise en correspondance entre les éléments des deux modèles à interconnecter.

Chapitre 4 Le Building Simulation Model : une approche inspirée par l'ingénierie dirigée par les modèles

Sommaire

I. Un modèle neutre, en accord avec les principes de l'ingénierie dirigée par les modèles	58
I.1. La nécessité d'un modèle neutre	58
I.2. L'interopérabilité dans l'ingénierie dirigée par les modèles	60
I.3. Model-Driven Architecture (MDA)	60
II. Le Building Simulation Model comme modèle neutre en conception numérique	63
II.1. Points communs entre le BSM et le PIM	63
II.2. Le Building simulation Model	65
II.2.1. Indépendance et généricité	65
II.2.2. Architecture du BSM	66
II.2.3. Le BSM, un modèle extensible	68
Conclusion	69

Dans le chapitre précédent, suite à l'application de la méthodologie IDM (Information Delivery Manual), nous avons obtenu un MVD (Model View Definition) pour la simulation énergétique. La proposition que nous développons à présent consiste à se baser sur le MVD pour définir un modèle intermédiaire qui jouera le rôle de pivot pour la simulation. Cette proposition est inspirée de l'approche de l'architecture dirigée par les modèles (MDA, pour Model-Driven Architecture), venant du domaine de l'ingénierie logicielle, dans laquelle on propose de différencier une catégorie de modèles neutres (ou indépendants de la plateforme visée), d'une catégorie de modèles dits spécifiques, autrement dit spécialisés, à une plateforme. Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord introduire les notions fondatrices du domaine de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM), dont vient cette approche. Nous apporterons en particulier des précisions sur ce que recouvrent les notions de modèles neutres et de modèles spécifiques à une plateforme. Ensuite, nous introduirons le Building Simulation Model (BSM), un apport original, qui est une traduction de l'approche MDA pour la conception numérique du bâtiment. Le BSM est un modèle intermédiaire, orienté objet, visant à être générique et flexible. Enfin, une section décrira plus précisément le BSM, en détaillant l'objectif de son implémentation et ses différentes propriétés.

I. Un modèle neutre, en accord avec les principes de l'ingénierie dirigée par les modèles

I.1. La nécessité d'un modèle neutre

Le développement des modèles de l'ensemble du bâtiment pour la simulation énergétique est une opération longue et lourde [64]. La réutilisation des données existantes par des processus interopérables permet de réduire considérablement le temps et les coûts associés à la création de modèles de simulation [27]. Cependant, un fossé existe encore entre les diverses disciplines intervenant en conception (architecture, mécanique, électricité, plomberie, énergie) que les outils informatiques disponibles n'ont toujours pas réussi à combler.

En ce qui concerne la géométrie du bâtiment, les spécialistes de la simulation reçoivent généralement des dessins CAO en 2D de l'architecte mais doivent recréer le modèle de bâtiment dans leur outil de simulation. D'autres incompatibilités existent dans les domaines de la simulation et même entre outils de simulation dans un même domaine. Or, il est nécessaire tout au long du processus et en dépit des échanges de préserver l'intégrité des données. Pour cela, on doit définir des approches et des outils permettant à la fois d'optimiser l'échange de données et de garantir l'intégrité et la fiabilité de l'information transmise.

Un modèle de simulation interopérable, intelligent et orienté objet permettrait l'échange de données bidirectionnel avec le BIM. Cependant, les modèles de données de simulation sont spécifiques aux outils, et prennent généralement la forme de fichiers texte peu structurés. Les interfaces pour l'échange de données sont insuffisantes et, en particulier, il n'existe pas d'interface standard officielle pour le domaine de la simulation. Les outils de simulation existants (EnergyPlus, DOE-2, IES, etc.) s'appuient sur des outils d'édition « sur mesure » et ne parviennent pas à tirer pleinement profit des formats de données standards disponibles.

Comme on l'a vu précédemment, des formats d'échange tels que gbXML ont été définis pour remédier aux problèmes d'interopérabilité [108]. Un tel format prend en charge le flux unidirectionnel de données CAO vers des outils de simulation mais se concentre généralement sur des données géométriques, laissant de côté des composants pourtant très importants, tels que les systèmes HVAC. En outre, les formats disponibles (notamment gbXML) ne permettent pas de modéliser la totalité de l'information géométrique [28]. Ils ne permettent pas non plus de préserver les relations géométriques telles que définies dans le BIM. De ces limitations, résulte un risque d'interprétations partielles ou erronées de l'information exprimée à l'aide de ces formats de données.

À noter que l'IFC, qui a le potentiel d'être utilisé comme un modèle de données de production pour la simulation, a aussi un certain nombre de limitations. Par exemple, il ne permet pas de modéliser certaines informations d'entrée des logiciels de simulation thermique.

Ces considérations nous permettent de conclure que le domaine de la simulation requiert un modèle de données interopérable qui :

- autorise l'exportation des données pertinentes vers des outils de simulation existants,
- est générique et puisse être compatible avec plusieurs outils de simulation,
- assure un échange bidirectionnel des données avec le BIM, permettant ainsi la réutilisation des données d'origine dans la simulation.

Ces considérations sont également celles qui ont emmené la communauté de l'ingénierie dirigée par les modèles à définir la notion de modèle « neutre ». Il s'agit d'un modèle qui inclut l'information d'intérêt (et en permet ainsi la capitalisation) et qui n'est pas spécifiquement lié à une plateforme. Pour cette raison, il nous a semblé pertinent d'opérer une translation de ce concept vers le domaine de la conception numérique du bâtiment. Afin de préciser plus avant notre propos, nous décrivons dans les sections suivantes quelques notions fondatrices de l'ingénierie dirigée par les modèles.

I.2. L'interopérabilité dans l'ingénierie dirigée par les modèles

La question de l'interopérabilité est une grande préoccupation en ingénierie des modèles où de nombreuses opérations sont nécessaires pour gérer les différents langages de modélisation. L'ingénierie dirigée par les modèles, communément appelée MDE (Model Driven Engineering), prône l'utilisation de modèles pour la conception des systèmes. En MDE, trois niveaux de modélisation sont différenciés : méta-méta-modèles, méta-modèles et modèles terminaux (instances) [74], où les modèles de terminaux représentent le système du monde réel, le méta-modèle décrit les différents éléments d'un modèle terminal avec ses différentes relations, et le méta-méta-modèle est destiné à définir les méta-modèles.

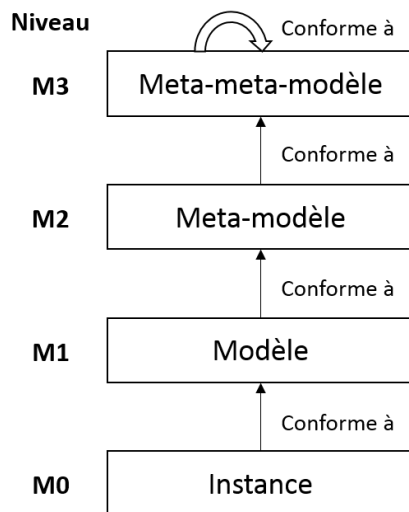


Figure 14 : Les différents niveaux de modélisation en Model-Driven Engineering.

L'Object Management Group (OMG) [6], dont l'objectif est de standardiser et promouvoir le modèle objet, a introduit l'architecture à quatre niveaux illustrée en figure 14 ci-dessus. Au niveau inférieur, la couche M0 est le système réel. Un modèle représente ce système au niveau M1. Ce modèle est conforme à son méta-modèle défini au niveau M2 et le méta-modèle lui-même est conforme à son méta-méta-modèle au niveau M3. Enfin, le méta-méta-modèle est conforme à lui-même (définition réflexive).

I.3. Model-Driven Architecture (MDA)

Les concepts méthodologiques véhiculés par l'ingénierie dirigée par les modèles se sont cristallisés dans un document de synthèse issu de l'Object Management Group (OMG) [99], qui a proposé en 2001 le concept de « Model Driven Architecture » (MDA).

L'approche MDA prône l'utilisation de langages de modélisation sur l'ensemble du cycle de développement des systèmes, et non plus une utilisation limitée à la phase de conception.

L'approche MDA et plus généralement le paradigme du MDE reposent sur une utilisation élargie (voire systématique) de modèles qui sont alors considérés comme des « citoyens de première classe ». Mais qu'est-ce qu'un modèle, au sens du MDE ? Dans [109], un modèle est par exemple défini comme « un ensemble de déclarations sur un système à l'étude ». Bézin et Gerbe [34] définissent un modèle comme « une simplification d'un système intégré avec un objectif visé à l'esprit. Le modèle devrait être en mesure de répondre aux questions à la place du système actuel ». Selon Mellor et al. [107] un modèle « est un ensemble cohérent d'éléments formels décrivant quelque chose (par exemple, un système, une banque, un téléphone, un train) construit dans le but de se prêter à une forme particulière d'analyse comme la communication d'idées entre les personnes et les machines, la génération de cas de tests, la mise en œuvre de transformations etc ». Le guide MDA [6] définit un modèle d'un système comme « une description ou la spécification de ce système et de son environnement pour une certaine fin. Un modèle est souvent présenté comme une combinaison de texte et des dessins. Le texte peut être exprimé à l'aide d'un langage dédié ou en langage naturel ». On retiendra dans la suite cette dernière définition qui a l'avantage d'être issue d'un organisme de standardisation.

L'approche MDA classe les modèles en trois catégories: le « Computational-Independent Model » (CIM), le « Platform-Independent Model » (PIM) et le « Platform Specific Model » (PSM). Ces 3 modèles décrivent le système en cours d'élaboration à différents niveaux d'abstraction. En particulier, selon le guide MDA, un CIM est une vue d'un système à un niveau d'abstraction qui le rend indépendant des modalités d'exécution. Un CIM ne montre pas de détails sur la structure des systèmes. Un CIM est parfois appelé un modèle de domaine : c'est un modèle spécifique à un domaine applicatif (ou une discipline). Un corollaire est que le CIM peut être associé à un langage de modélisation et un vocabulaire qui sont familiers aux praticiens du domaine en question.

Un PIM est quant à lui une vue d'un système indépendante de la plateforme d'exécution visée. Il présente un degré d'abstraction suffisant pour qu'il soit possible de projeter l'information de conception qu'il contient vers plusieurs plateformes d'exécution. Le développement d'un système logiciel conforme à l'approche MDA commence (après la phase initiale de définition du CIM) par la construction de modèles indépendants de la plateforme (PIM), qui sont raffinés et transformés en un ou plusieurs modèles spécifiques à la plateforme (PSM).

Un PSM est une vue d'un système spécifique à la plateforme d'exécution visée. Un PSM combine les spécifications du PIM avec des détails additionnels qui spécifient comment ce système peut s'exécuter sur un type particulier de plate-forme. Les définitions

du PIM et du PSM reposent sur le concept de plateforme défini dans le guide MDA comme « un ensemble de sous-systèmes et des technologies qui offrent un ensemble cohérent de fonctionnalités grâce à des interfaces et des modèles d'utilisation spécifiés, de telle sorte que toute application supportée par cette plate-forme peut s'exécuter sans avoir une connaissance détaillée des mécanismes sous-jacents ». L'une des principales motivations de ce travail de formalisation des concepts et de la méthode est de permettre aux utilisateurs d'opérer une séparation claire des fonctionnalités du système et de sa mise en œuvre sur une plateforme de technologie donnée.

In fine, les PSM sont censés être transformés en code (on rappelle que l'approche MDA et le MDE sont, au moins à l'origine, essentiellement dédiés aux systèmes logiciels).

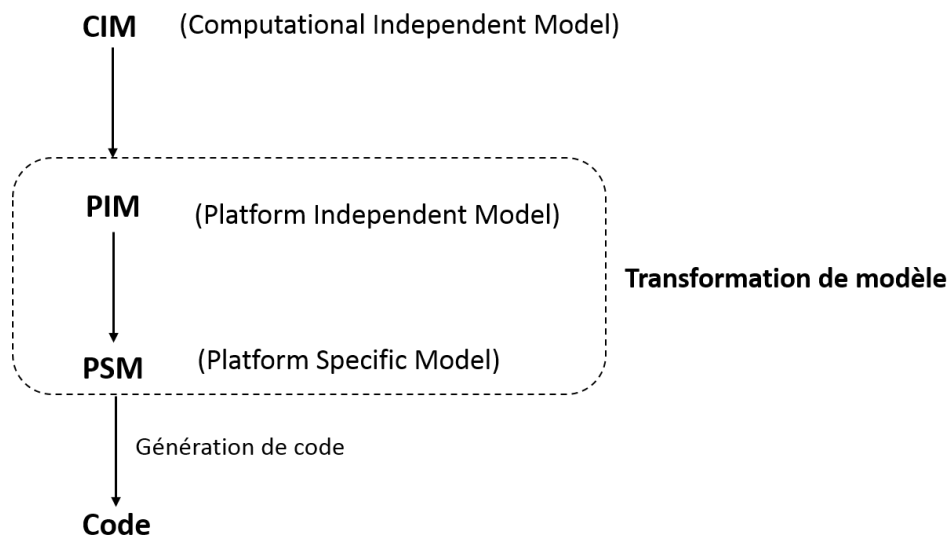


Figure 15 : Les différentes phases de l'approche MDA.

On remarque donc qu'en plus de la méta-modélisation, la transformation de modèle est une opération centrale dans le MDA (figure 15 ci-dessus). Le développement d'un système logiciel commence en effet par la construction d'un PIM, qui est ensuite affiné et transformé en un ou plusieurs PSM. Enfin, les PSM sont transformés en code. De cette façon, le MDA permet d'assurer une meilleure capitalisation de l'information de conception. Un PIM étant totalement indépendant de toute technologie spécifique, il est possible de le projeter sur différentes plateformes au moyen de transformations partiellement automatisées. Ainsi, on peut espérer permettre aux concepteurs de se concentrer uniquement sur la conception, la logique métier et l'architecture globale, en se préoccupant moins de la question de la mise en œuvre.

II. Le Building Simulation Model comme modèle neutre en conception numérique

L'ingénierie dirigée par les modèles est une approche de conception où les modèles jouent un rôle central. En effet, l'idée sous-jacente d'une approche de conception pilotée par les modèles est la possibilité de définir une solution à un problème grâce à la transformation itérative d'un modèle initial en modèles plus détaillés. L'abstraction initiale découle de la nécessité de pouvoir décrire une solution générique, indépendante de la technologie finale ou de la plate-forme sur laquelle cette solution est mise en œuvre. Ce modèle initial doit contenir toutes les informations et les concepts pertinents pour décrire complètement la solution. Le but ensuite est de convertir le PIM initial en un modèle plus spécifique qui représente une solution pour le problème sur une plate-forme spécifique, conduisant à ce qu'on appelle le modèle spécifique à la plateforme (PSM).

La transformation de modèle à modèle implique donc essentiellement une transformation des concepts du modèle abstrait initial à un bas niveau vers le modèle spécifique à la technologie. Évidemment, l'avantage d'une telle approche est que les différents PSM (un pour chaque plateforme spécifique) peuvent provenir d'un même PIM.

Le principe de l'approche MDA, et les concepts en lien, sont donc pertinents pour notre cas d'application : l'objectif serait de parvenir à définir un modèle pivot dédié à la simulation, mais qui resterait indépendant de l'outil de simulation visé. Ce modèle, que nous appellerons le BSM (Building Simulation Model) sera un moyen pour modéliser le bâtiment d'un point de vue énergie-simulation avec les informations nécessaires pour ce domaine, mais sans ajouter les informations spécifiques à l'environnement visé. Ce modèle est en quelque sorte le PIM du MDA et, de cette façon, nous obtenons une description d'un bâtiment pour la simulation mais de façon indépendante du moteur de simulation. En complément, grâce à une procédure de transformation de modèles, nous pouvons ensuite obtenir un PSM pour le moteur de simulation qui nous intéresse (COMETH, EnergyPlus, ou un autre outil) – avec, à la source, un BSM identique. Nous détaillons cette proposition dans la sous-section suivante.

II.1. Points communs entre le BSM et le PIM

Afin d'appliquer l'approche MDA à notre problématique, il est nécessaire de produire un modèle capable d'inclure l'ensemble des aspects couverts par les modèles de simulation, donc un modèle qui pourrait jouer le rôle de dénominateur commun à tous les modèles de simulation spécifiques. Ce modèle, que nous avons appelé Building Simulation Model (BSM), joue le rôle du PIM dans le contexte de l'approche MDA. Dans notre cas, l'indépendance à la plateforme se traduit comme l'indépendance au moteur de simulation.

Le « rôle » du PSM est joué par les modèles des moteurs de simulations ciblés (voir figure 16).

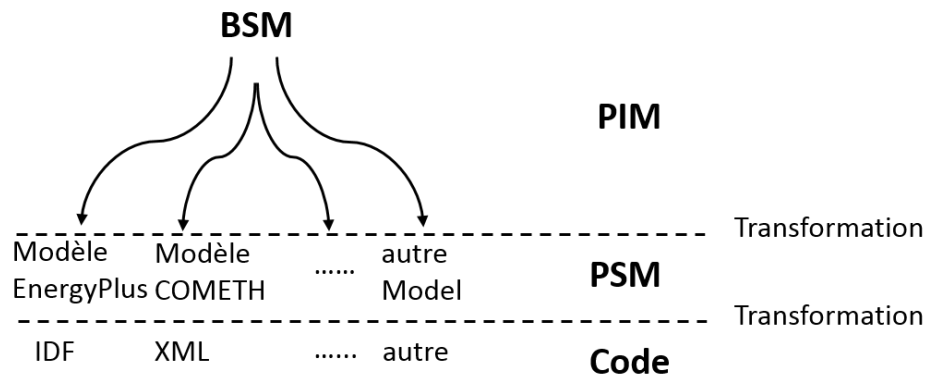


Figure 16 : Le Building Simulation Model en tant que modèle neutre.

La transformation de modèle est une opération centrale de l'approche MDA. Dans notre cas, le BSM est affiné et transformé vers un ou plusieurs PSM correspondants aux outils visés (COMETH, EnergyPlus, etc.). Enfin, les PSM sont traduits en fichiers de formats spécifiques (XML, IDF, etc.) exploitables par les outils de simulation.

Le BSM doit donc être conforme aux caractéristiques du PIM : indépendance à une plateforme spécifique, généricité et abstraction. Il est aussi préférable que le BSM soit un modèle orienté objet afin de se rapprocher autant que possible de l'esprit de l'approche MDA et des principes du MDE. Le tableau 11 ci-dessous donne une synthèse des exigences qui président à la définition du BSM. Nous les détaillons dans la sous-section suivante, tout en retranscrivant les étapes de définition du BSM.

Critère	Description
Indépendance, Généricité	Décrit le système indépendamment de toute plate-forme technique et de toute technologie utilisée pour déployer l'application.
Orienté objet	Représentable par un ensemble de diagrammes de classes UML.
Extensible	Décrit les propriétés des systèmes de manière abstraite, pérenne dans le temps.

Tableau 11 : Exigences à prendre en compte dans la définition du BSM.

II.2. Le Building simulation Model

II.2.1. Indépendance et généricité

Le Building Simulation Model (BSM) doit être un modèle de données interopérable pour le domaine de la simulation du bâtiment. Le BSM vise à être générique et à abstraire les notions et concepts nécessaires pour la simulation de l'énergie, afin de séparer les informations génériques de simulation énergétique de celles spécifiques liées à l'outil de simulation d'énergie adopté. L'abstraction fournie par le BSM permettra ensuite de projeter les concepts modélisés vers les formats d'entrée des moteurs de simulation spécifiques, tels que COMETH ou EnergyPlus, à l'aide de transformations de modèles (figure 17).

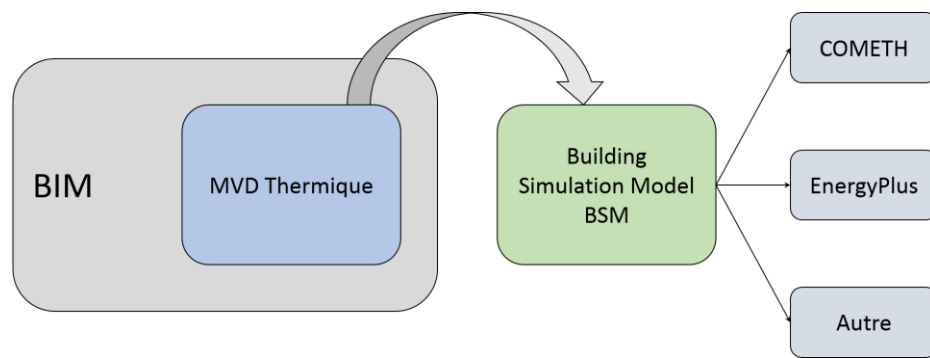


Figure 17 : Le Building Simulation Model en tant que PIM.

Dans notre cas, le modèle de bâtiment initial est un modèle BIM. L'IFC (Industry Foundation Classes) a été choisi comme le format de conception de référence ; il est donc le format d'entrée du processus présenté ici. Ce choix est principalement lié au fait que la norme que la IFC joue un rôle prépondérant dans le monde de la conception numérique du bâtiment. L'IFC4 (la version la plus récente) est considérée comme la version de référence, nos travaux ont donc été réalisés sur la base de cette version.

Le modèle BSM a été défini de façon incrémentale : une version initiale du modèle est proposée dans le but de s'abstraire du format d'entrée accepté par COMETH ou EnergyPlus, les premiers moteurs de simulation ciblés. À un stade ultérieur des travaux, le BSM est adapté et étendu afin de couvrir d'autres moteurs de simulation. La version initiale du BSM a été définie pour permettre de cibler deux moteurs (COMETH et EnergyPlus), permettant ainsi de faire une première démonstration de l'aptitude du BSM à modéliser un ensemble de concepts communs à plusieurs moteurs de simulation.

La mise en œuvre du BSM nécessite de réaliser deux transformations de modèle que l'on détaillera dans le chapitre 5 :

- une conversion de l'IFC vers le BSM (on précise que l'on parle ici d'un modèle IFC enrichi pour la simulation);
- la conversion du BSM en un modèle spécifique au moteur de simulation.

II.2.2. Architecture du BSM

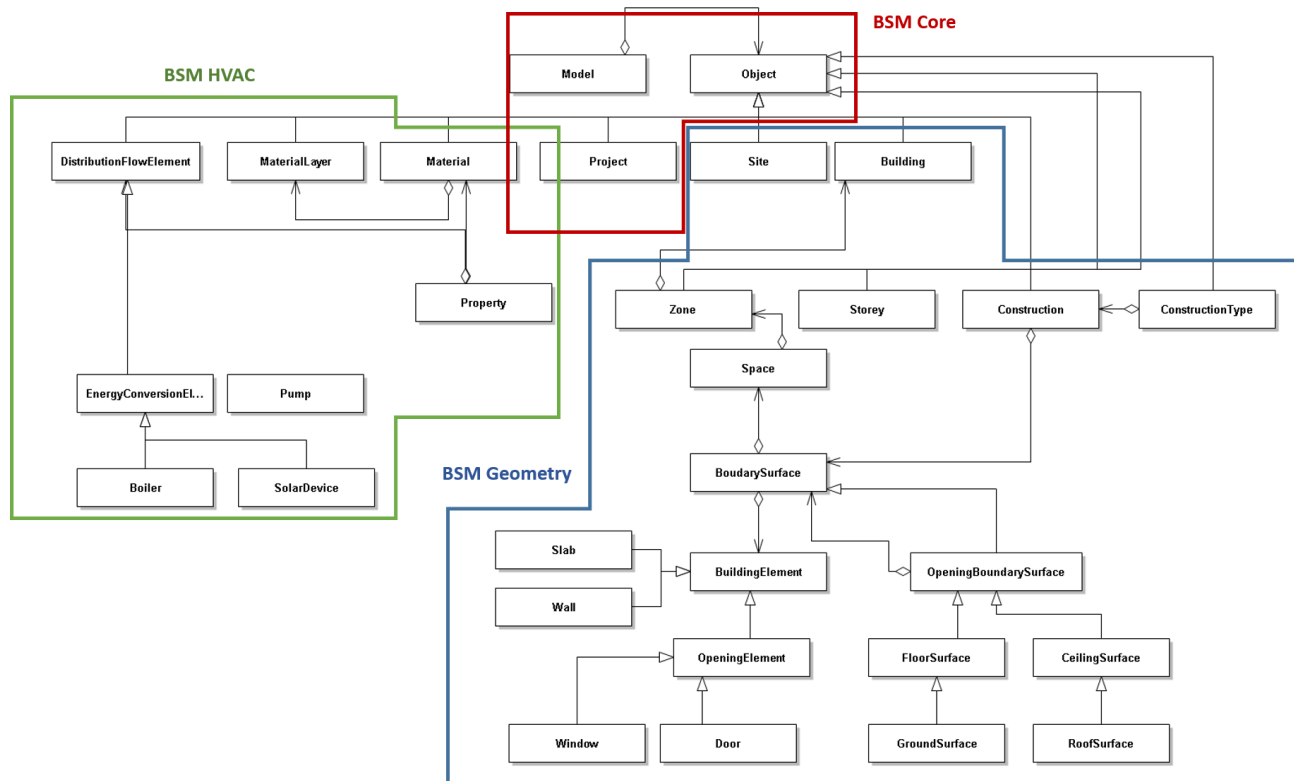


Figure 18 : Diagramme de classe (simplifié) du BSM.

La figure 18 montre un extrait du diagramme de classe UML du BSM : c'est un modèle orienté objet décrivant à la fois tous les éléments géométriques nécessaires, le matériel et les aspects spécifiques de la simulation. En effet, comme on peut le remarquer dans le diagramme de classe, le modèle contient tous les objets de la définition géométrique d'un bâtiment (étages, plafond, sol), ses éléments détaillés (porte, fenêtre, mur), et la composition détaillée des éléments (matériel). Le tableau 12 suivant récapitule les éléments du BSM et donne leur description. Il est à noter que, pour ce qui concerne la géométrie, une compatibilité amont (i.e. avec l'IFC) a été recherchée. On s'est pour cela appuyé sur le MVD défini au chapitre précédent. Cette partie du modèle est donc assez similaire à l'IFC, à ceci près que le BSM est nettement simplifié (notamment en réduisant les relations entre éléments au strict nécessaire). Concernant les systèmes HVAC, au contraire, le BSM est aligné sur les besoins des outils de simulation. À noter que, concernant les systèmes HVAC, la liste n'est pas exhaustive : l'extrait présenté comprend

uniquement les éléments permettant la modélisation d'une chaudière et des composants associés. Les attributs des classes ne sont pas présentés dans le tableau 12.

Type	Classes BSM	Description
BSM Core (classes racines)	Model	Cette classe est le conteneur de tous les objets du BSM nécessaires pour le modèle, il a la responsabilité de leur création, et suppression.
	Object	Contient les propriétés communes à tous les objets BSM.
	Project	Le projet établit le cadre pour l'échange d'informations.
BSM Geometry (Géométrie du bâtiment)	Site	Nom du site, numéro du site,...
	Building	Nom du bâtiment, numéro du bâtiment,...
	Storey	Élévation de l'étage, surfaces,...
	Space	Nom de l'espace, numéro de l'espace, Surfaces, hauteurs, volume total, volume utilisable, usage de l'espace,...
	BuildingElement	Contient les éléments du bâtiment : murs, colonnes, ports, fenêtres, escaliers,...
	OpeningElement	Contient les éléments transparents/ouvrants du bâtiment,...
	Slab	Épaisseur, surface, matériaux,...
	Wall	Situation (extérieur -intérieur), épaisseur et matériaux de chaque couche, longueur, hauteur, surface,...
	Window	Situation (extérieur -intérieur), matériaux, hauteur et largeur totale, sens d'ouverture, surface vitrée,...
BSM HVAC (systèmes HVAC)	DistributionFlowElement	Les éléments d'un système de distribution qui facilitent la distribution de l'air, l'eau,...
	Boiler	Type du ballon d'eau chaude, Volume, température...

Tableau 12 : Extrait de la liste des classes du BSM et descriptions associées.

On note que le BSM est structuré en trois grandes parties :

- BSM *Core* où on retrouve les classes « Model » et « Object ». Ce sont deux classes abstraites à partir desquelles vont découler les autres classes du BSM. On retrouve aussi la classe « Project » qui établit le cadre pour l'échange d'information ;
- BSM *Geometry* qui contient les classes d'objet décrivant la géométrie du bâtiment. On y retrouve le site, le bâtiment, la zone, les espaces et les éléments du bâtiment ;
- BSM *HVAC* qui est représenté par la classe « DistributionFlowElement » et qui contient les composants HVAC (pompe, chaudière, panneau solaire).

II.2.3. Le BSM, un modèle extensible

Notre objectif est que le BSM permette de cibler plusieurs outils de simulation. Comme indiqué précédemment, nous avons suivi pour le développement du BSM une compatibilité amont pour la géométrie, aval pour les systèmes HVAC. Sur ce dernier point, nous avons suivi les exigences issues de nos deux premiers outils cibles, COMETH et EnergyPlus.

Dans le cas de COMETH, par exemple, on doit répondre aux caractéristiques de la Réglementation Thermique française - RT2012 (Voir annexe I). Le BSM doit donc contenir les informations qui manquent dans l'IFC afin d'aller vers le moteur de simulation français.

Par exemple, dans COMETH, trois paramètres permettent d'établir le bilan énergétique de la fenêtre (Window). Ce sont l'isolation thermique de la menuiserie vitrée (U_w), le facteur solaire (S_w) qui traduit la capacité de la menuiserie vitrée à transmettre la chaleur solaire dans la maison, et le facteur de Transmission Lumineuse (T_{lw}) qui représente la capacité à transmettre la lumière naturelle à l'intérieur d'une pièce. La prise en compte de ces trois paramètres, ainsi que la localisation géographique et l'exposition de l'habitation sont indispensables. Les deux derniers paramètres peuvent être extraits de l'IFC mais ce n'est pas le cas de (U_w) et (S_w). Nous avons donc ajouté ces paramètres dans le BSM.

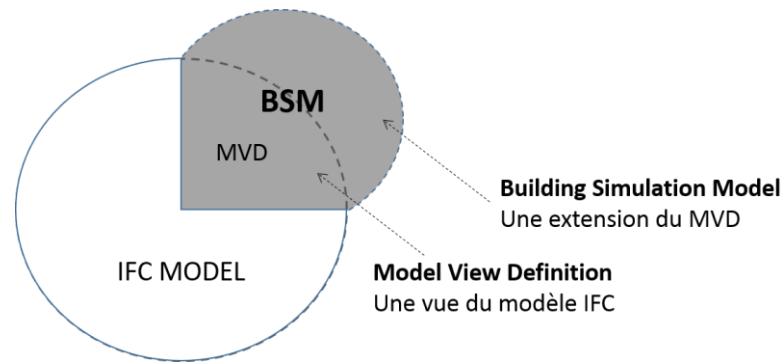


Figure 19 : Le Building Simulation Model, une extension du MVD pour la simulation.

On peut donc considérer que le BSM est une extension du modèle de données issu du MVD défini dans le chapitre précédent (Figure 19 ci-dessus). Le MVD est en effet une extraction de l'IFC, en vue de sélectionner les éléments pertinents pour la simulation, mais il ne couvre pas l'ensemble du spectre nécessaire au passage vers les modèles de données des outils. Il est donc nécessaire dans certains cas de le compléter (voir l'exemple du paragraphe précédent) avec des éléments additionnels. Cette démarche est facilitée par deux caractéristiques clefs du BSM : l'orientation objet qui apporte de façon native des facilités d'extension (héritage, ajout d'attributs), et une structure arborescente incluant des classes de haut niveau d'abstraction qui peuvent être spécialisées au besoin. Il est à noter que le BSM n'a pas vocation à intégrer l'ensemble des objets de l'ensemble des modèles de données des outils visés. Au contraire, le but est de maintenir la compacité du BSM afin de faciliter sa compréhension et son utilisation.

On verra dans le chapitre suivant qu'il est parfois possible d'ajouter de l'information lors de la transformation de modèle depuis le BSM vers le modèle de données outil (par exemple, lorsqu'un élément du modèle de données visé peut être déduit à partir d'une combinaison d'éléments et paramètres du BSM). Lorsque ce sera possible, on préférera suivre cette voie afin d'éviter d'alourdir le BSM.

Enfin, on précisera que la version courante du BSM, issue de ce travail de thèse, n'est qu'une première étape. Le BSM doit être enrichi et consolidé au fur et à mesure que l'on étend sa compatibilité à d'autres environnements de simulation.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle pivot pour la simulation énergétique : le Building Simulation Model (BSM). Le BSM est issu d'une analogie entre le domaine de l'ingénierie dirigée par les modèles (approche MDA) et celui de la conception numérique du bâtiment. Le BSM est un modèle neutre conforme à la description que le MDA donne des modèles indépendants de la plateforme (PIM). Il a vocation à subir une transformation, de laquelle résulteront un ou plusieurs PSM

(modèles spécifiques à la plateforme) qui dans notre cas, représentent le(s) modèle(s) de simulation spécifique(s) au moteur de simulation.

Nous avons également décrit la première version du BSM, un modèle orienté objet pour la description du bâtiment du point de vue de la simulation énergétique. Il est basé sur le MVD IFC décrit dans le chapitre précédent, et sur la prise en compte des caractéristiques des deux outils visés dans cette première étape : COMETH et EnergyPlus.

Un objectif de ce travail était également de faciliter la prise en compte des besoins futurs. Le BSM a donc été conçu pour être nativement évolutif.

Chapitre 5 Développement de la plateforme logicielle de traduction BIM IFC – Simulation thermique

Sommaire

I. Fonctionnalités du logiciel et exigences	72
I.1. Le processus à mettre en œuvre	72
I.2. En amont du processus de transformation : la création du BIM	74
I.3. Note sur le choix du langage de développement	74
I.4. Note sur les diagrammes de classe UML2	75
I.5. La version IFC utilisée dans le prototype	75
I.6. Description du cas d'application	75
II. Caractéristiques du logiciel – Eléments de conception	76
II.1. Implémentation du BSM	77
II.2. Module de traduction IFC vers BSM	78
II.3. Implémentation du modèle de données COMETH	79
II.4. Implémentation de la traduction BSM vers COMETH	82
II.4.1. Mapping direct	82
II.4.2. Mapping par calcul	83
II.4.3. Ajout de données externes	83
II.4.4. Résumé sur les règles de correspondances	83
II.5. Résultats des tests	84
Conclusion	85

Ce chapitre présente l'approche adoptée pour le développement du prototype logiciel permettant de valider la traduction du Building Information Model (BIM) IFC vers un modèle pour la simulation thermique, ici le moteur de simulation thermique COMETH, en passant par un modèle intermédiaire générique que nous avons appelé le Building Simulation Model (BSM) et introduit au chapitre précédent. Rappelons que nous avons créé une vue (MVD) dédiée à la simulation thermique à partir de laquelle nous avons pu déduire ce modèle intermédiaire, dont la valeur ajoutée est double : il permet de modéliser les éléments dépendant d'un outil de simulation spécifique et il offre suffisamment de flexibilité pour être étendu de façon itérative. Comme on le verra, l'architecture du logiciel est similaire au processus de transformation, avec deux modules permettant respectivement la traduction d'un BIM IFC au format BSM et la traduction depuis le BSM vers le moteur de simulation. Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes phases de conversion ainsi que les éléments logiciels associés de façon plus détaillée. Les différents supports utilisés (langage informatique et langage de modélisation de l'architecture) sont également décrits succinctement pour plus de clarté.

I. Fonctionnalités du logiciel et exigences

Le but de cette première section est de résumer les exigences qui s'appliquent au logiciel et les fonctionnalités qui en découlent. La première sous-section porte sur le processus de génération que l'on souhaite mettre en œuvre. Les sous-sections suivantes mettent en exergue des points qui ont une influence sur les choix de conception : les modalités de création du BIM en amont du processus, ainsi que les supports de conception et développement (langage d'implémentation, langage support de conception, version de l'IFC).

I.1. Le processus à mettre en œuvre

Nous avons utilisé dans une étape précédente la méthodologie IDM pour définir le processus (étapes, activités et informations échangées) de génération d'un modèle pour la simulation thermique depuis un BIM IFC. Cette modélisation – ainsi naturellement que les spécificités du moteur de simulation thermique visé, COMETH – nous ont servi de référence dans les travaux de conception et développement de ce prototype logiciel. Les principales exigences que nous avons prises en compte sont les suivantes :

- génération du modèle en deux étapes, incluant la génération d'un modèle intermédiaire Building Simulation Model conforme aux spécifications données dans le chapitre précédent et la génération d'un fichier d'entrée COMETH à partir des informations provenant du BSM ;
- conformité de l'information générée avec les spécifications des modèles de données du moteur de simulation COMETH afin d'être en mesure d'exécuter les

simulations thermiques et d’obtenir les estimations de performances énergétiques.

Nous avons donc développé un logiciel qui peut traduire, en premier lieu, les données du BIM vers un BSM, et ensuite générer à partir du BSM le modèle COMETH ; la mise en œuvre de ces deux phases impliquant le développement des règles de traduction non triviales. On contribue ainsi, en particulier à l’aide de la phase intermédiaire basée sur le BSM, à la réalisation de l’objectif de notre recherche, qui est l’extraction et la réutilisation des données du BIM pour la simulation énergétique des bâtiments, avec un plus grand degré de généricité que les approches de l’état de l’art.

La conception et le développement du prototype se sont déroulés en cinq étapes :

1. extraction des exigences définition des spécifications de haut niveau à partir de la modélisation IDM/MVD du processus de conversion ;
2. définition des règles de traduction depuis le BIM IFC vers le BSM, et depuis le BSM vers le moteur COMETH à partir des exigences d’échanges (*exchange requirements*) issues de la modélisation IDM/MVD,
3. conception de l’architecture du logiciel de traduction. Ce travail a en particulier porté sur la réalisation de diagrammes de classes UML (Unified Modelling Language),
4. implémentation du modèle de données COMETH dans le langage informatique choisi (C++), et développement du module du mapping du BSM vers COMETH dans ce même langage,
5. réalisation de tests pour la validation.

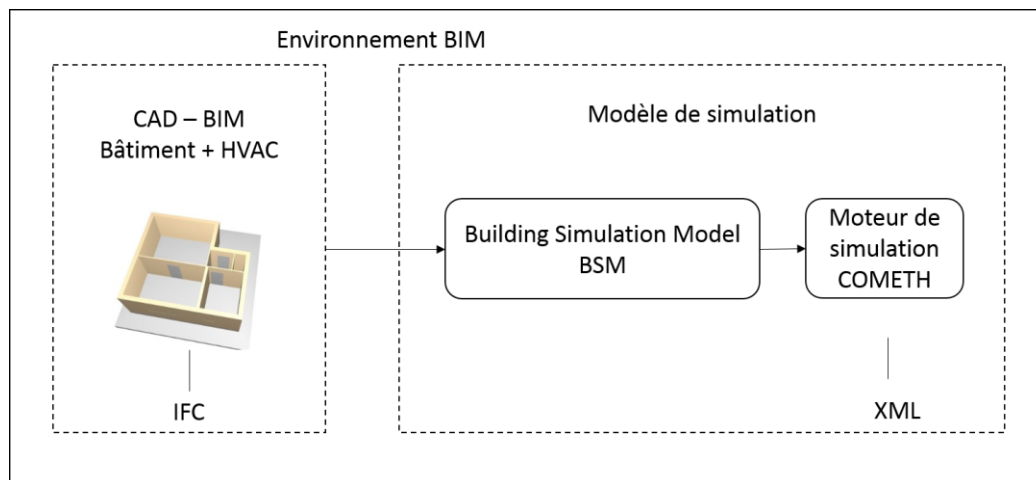


Figure 20 : Schéma général de la fonctionnalité visée.

Le processus mis en œuvre est schématisé en figure 20. Le modèle de base est créé avec un BIM au format IFC qui permet de générer une instance du modèle de simulation intermédiaire BSM. Ce dernier est ensuite utilisé pour générer une instance de modèle COMETH. On notera que cette dernière étape de génération nécessite d'ajouter au modèle des éléments additionnels, nécessaires à la simulation (comme les caractéristiques des systèmes Chauffage-Ventilation-Climatisation). De plus, le fichier d'entrée du moteur de simulation est généré au format XML depuis l'instance de modèle COMETH.

I.2. En amont du processus de transformation : la création du BIM

Le modèle BIM IFC est généré à l'aide d'un logiciel de CAO (la plupart des logiciels de CAO intègrent désormais une fonctionnalité d'export IFC – c'est le cas par exemple des outils Autodesk) une fois la conception emmenée à un stade d'avancement suffisant (volumes, zones, caractéristiques des parois) par l'architecte. Le BIM IFC ainsi généré doit ensuite être complété par des spécialistes des systèmes énergétiques (typiquement, bureau d'études thermiques) afin d'ajouter les informations relatives aux systèmes énergétiques. Il est à noter que, le plus souvent, cette information n'est pas ajoutée au modèle architectural, mais fait l'objet du développement d'un modèle séparé. Il est alors nécessaire de faire appel à un spécialiste des échanges de données afin de coordonner les activités de modélisation et gérer la fusion des modèles partiels. Ceci est crucial pour la cohérence de l'ensemble du BIM et pour assurer une collaboration efficace. On peut espérer que cette étape soit facilitée par un outillage logiciel plus performant dans un avenir proche. En l'état actuel des pratiques, elle reste difficile à mettre en œuvre. Nous prenons dans le cadre de ce travail l'hypothèse de la disponibilité d'un BIM IFC complet et valide en entrée de notre processus.

I.3. Note sur le choix du langage de développement

Le langage de programmation choisi est le C++ [49]. Il est orienté objet disposant de structures de programmation avancées basées sur la notion de classe (type structuré comprenant des attributs et des fonctions) et d'objets (instances des classes) : héritage et polymorphisme étant les principaux. Le C++ est très populaire en particulier pour le développement d'applications qui nécessitent une vitesse et un accès à certaines fonctions du système de bas niveau. Cette spécificité en fait un langage particulièrement apprécié de la communauté des développeurs d'applications graphiques. Cela se traduit notamment, dans le domaine qui nous intéresse, par sa popularité dans les environnements de visualisation 3D et sa compatibilité avec les outils BIM existants. On peut citer l'exemple de l'environnement de visualisation et d'édition de maquettes numériques IFC EveBIM [58], qui est développé par le CSTB, et avec lequel notre outil pourrait, à terme, être connecté. Pour ces raisons, nous avons décidé de baser nos développements sur le langage C++.

I.4. Note sur les diagrammes de classe UML2

La conception de notre logiciel s'est en partie appuyée sur la réalisation de diagrammes de classes, permettant de représenter les composants du logiciel et leurs relations. Les diagrammes de classes (issus du langage de modélisation graphique UML 2) [9] sont un pilier de l'analyse et de la conception orientée objet. Ils permettent de représenter les classes du système, leurs relations (d'héritage, d'agrégation, d'association, de dépendance), et les méthodes (fonctions) et attributs des classes. Les diagrammes de classes sont utilisés à plusieurs étapes du processus de conception, en particulier lors de la modélisation conceptuelle (phase analyse) et de la conception détaillée.

I.5. La version IFC utilisée dans le prototype

IFC4 est la dernière version de la norme ISO 16739 – le standard de description des modèles numériques de bâtiments (Organisation internationale de normalisation 2013). L'IFC4 inclut plusieurs améliorations par rapport à la version précédente (IFC 2x3). En particulier, la nouvelle version de l'IFC étend les possibilités de description des limites spatiales. De plus, la sémantique des systèmes CVC a également été significativement enrichie, en particulier à travers l'extension du champ des systèmes décrits et de leurs relations. Ce point était particulièrement pénalisant dans la version IFC2x3 car les systèmes CVC étaient modélisés de façon trop générique, ce qui constituait un obstacle à la modélisation fine de l'information relative à ces systèmes qui est nécessaire dans le cadre de la simulation énergétique.

I.6. Description du cas d'application

Afin d'illustrer la relation entre les modèles de conception et d'analyse de l'énergie, nous avons réalisé une étude de cas portant sur la simulation énergétique d'une maison individuelle. Il s'agit d'un cas relativement basique mais représentatif de cas réels.

La géométrie de cette maison est celle des maisons « INCAS ». Le moteur de simulation visé est COMETH, et la simulation sera réalisée en mode passif. L'objectif de l'étude est de valider le logiciel de traduction IFC – COMETH (incluant la transition par le BSM) décrit dans les sections précédentes. On notera que l'efficacité énergétique passive est liée aux matériaux et à la construction (matériaux d'isolation, vitrage, orientation du bâtiment, etc.) tandis que l'efficacité active est liée aux systèmes et aux équipements (rendement énergétique), ainsi qu'au comportement des utilisateurs du bâtiment.

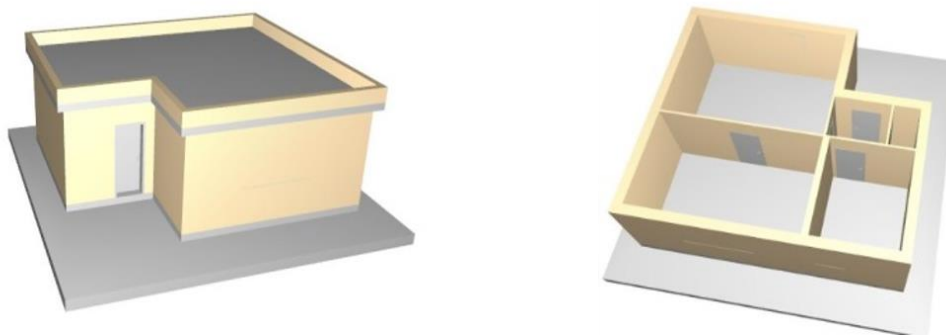


Figure 21 : La géométrie de la maison INCAS, base de notre cas d'utilisation.

La Figure 21 représente la géométrie d'une maison « INCAS ». Ce sont des maisons expérimentales du CEA dédiées à l'expérimentation et l'étude de systèmes innovants pour la gestion énergétique du bâtiment, hébergées par l'Institut National de l'Energie Solaire à Chambéry. Le bâtiment est sur un seul étage, composé de 5 espaces et contenant trois portes intérieures, une porte extérieure, plusieurs fenêtres sur chaque mur, une dalle de sol et un toit.

Nous nous positionnons en mode de simulation passif, ce qui signifie que nous ne prenons pas encore en compte les systèmes HVAC, mais seulement la conception du bâtiment et ses besoins thermiques.

II. Caractéristiques du logiciel – Eléments de conception

Le composant pivot de notre chaîne de traitement est le BSM. Pour son implémentation nous utilisons un Model View Définition (MVD) spécifique, que nous avons développé précédemment (chapitre 3). Rappelons qu'un MVD est un sous-ensemble du schéma IFC qui définit les exigences des échanges spécifiques à la discipline.

Ce BSM, comme indiqué dans le chapitre précédent, a été conçu pour faciliter l'interopérabilité entre le BIM et les outils de simulation, tout en favorisant la capitalisation de données numériques d'intérêt pour la simulation thermique. Une autre de ses caractéristiques est d'être facilement extensible afin de faciliter les évolutions futures du prototype. Le BSM possède en particulier les caractéristiques suivantes :

- il facilite la projection vers et à partir de modèles de domaine connexes ;
- il est à la fois structuré et offre un degré de flexibilité (les entités sont définies à partir d'éléments génériques de haut niveau qui permettent la définition ultérieure de concepts additionnels);

- il définit sans ambiguïté les objets et les propriétés (attributs) d'intérêt pour la simulation ;
- il permet d'obtenir en sortie un fichier au format spécifique du moteur de simulation (dans le cas de COMETH, XML). D'autres outils peuvent être visés.

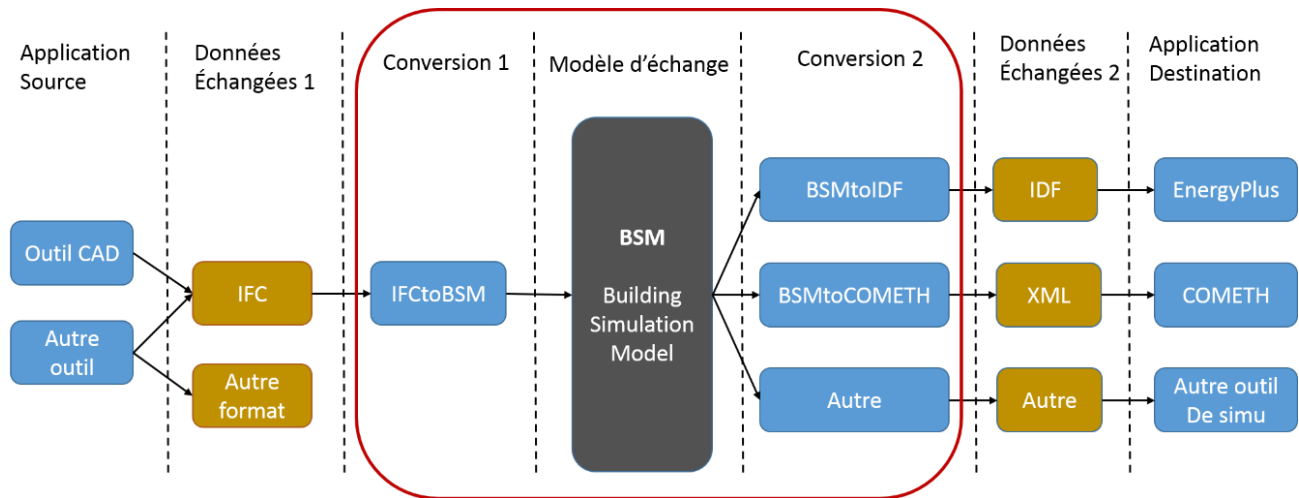


Figure 22 : Flux d'information depuis l'IFC vers les outils de simulation, avec le BSM en pivot.

La figure 22 illustre la structure générale du logiciel, dont le BSM est le principal élément, et la situe dans le processus général (depuis la génération du BIM vers l'exécution de la simulation). Divers logiciels sources peuvent exporter les données de conception au format IFC, pour les deux domaines visés (architecture et systèmes HVAC). Les frontières du logiciel (en rouge) englobent le BSM et des deux modules de conversion qui l'accompagnent (conversion 1 et conversion 2). La première conversion a pour but d'intégrer le MVD dans le BSM. Une fois cette dernière effectuée, la seconde étape de conversion concerne la transformation des objets/propriétés du BSM vers le format du modèle du moteur de simulation en destination (XML pour COMETH, IDF pour EnergyPlus).

II.1. Implémentation du BSM

Le BSM, comme présenté dans le chapitre précédent, est un modèle de données pour la simulation de l'énergie de l'ensemble du bâtiment qui a été utilisé pour la réalisation d'une connexion avec COMETH. Pour l'implémentation du modèle BSM, nous avons utilisé le langage C++ (voir justification dans la section précédente). La figure 23 rappelle le diagramme de classe vu dans le chapitre 3, décrivant l'architecture du modèle BSM. On pourra remarquer qu'au niveau géométrique, le BSM reste proche du standard IFC : on retrouve notamment la hiérarchie *Building-Storey-Zone-Space*. Il est cependant nettement simplifié par rapport à l'IFC (en particulier pour ce qui concerne les relations entre éléments) et inclut des éléments et attributs nécessaires en simulation thermique.

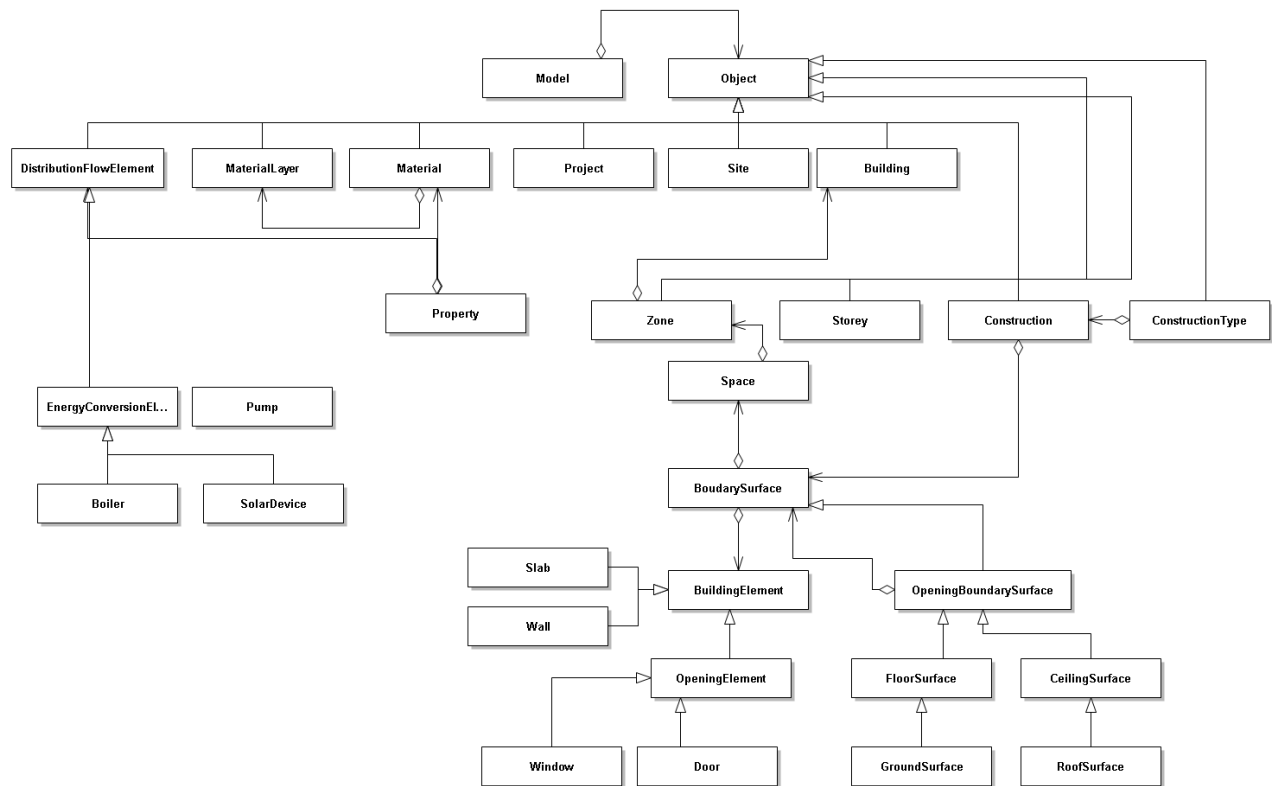


Figure 23 : Extrait du diagramme de classes du BSM.

II.2. Module de traduction IFC vers BSM

Notre prototype comprend deux modules de conversion. Le premier module porte sur le passage du BIM/IFC pour aller vers le BSM.

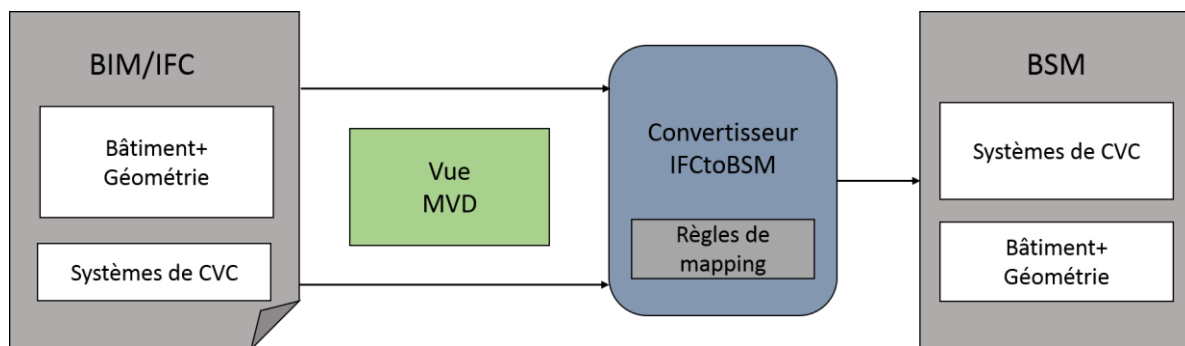


Figure 24 : Principe du processus de transformation de l'IFC vers le BSM.

La figure 24 présente le processus de génération du BSM. Il débute par l'export (au format IFC) des informations détaillées de conception définies par un architecte à l'aide d'un logiciel de CAO. Il est à noter que peu de logiciels de CAO, à l'heure actuelle, sont en mesure de réaliser des exports fiables de fichiers IFC4 – la plupart étant basés sur la version précédente de l'IFC (2x3). Cependant, nous avons choisi de viser le long terme et

avons fait le pari que cette situation ne prévaudra plus dans les évolutions de ces outils – d'où le choix de l'IFC4. La conversion du modèle IFC vers le BSM se déroule ensuite en deux étapes. La première étape consiste à convertir la géométrie du bâtiment et les données relatives aux systèmes contenues dans le fichier IFC, cela en conformité avec le tableau des exigences d'échange (Exchange Requirements) établi dans le cadre de l'IDM (Information Delivery Manual) expliqué dans le chapitre 3. Plus précisément, ce tableau (présenté dans sa version complète en annexe II) effectue une correspondance qui relie les éléments extraits de l'IFC aux entités créées dans le BSM. La deuxième étape consiste à enrichir et compléter, quand cela est requis, le BSM pour pouvoir effectuer la deuxième étape de conversion « BSMtoCOMETH ». Pour cela, il est nécessaire de compléter l'information extraite de l'IFC pour effectuer la simulation avec l'outil visé, tout en veillant à conserver la généricité du BSM (voir section II.4.1).

Ces deux étapes sont réalisées à l'aide d'un premier module logiciel, nommé « IFCToBSM », qui extrait les données pertinentes de l'IFC et les intègre dans le BSM créé, selon les spécifications contenues dans le MVD défini préalablement. Les données géométriques, en particulier, sont exportées de l'IFC vers le BSM.

```
void BuilderDoor::mappingRules()
{
    std::wstring ws = this->o_ifc_door->getName();

    // set name
    this->o_bsm_door->setName(std::string(ws.begin(), ws.end()));

    BuilderProperty::mappingProperties(o_ifc_door, o_bsm_door);

    // set construction type
    this->o_bsm_door->setConstruction(o_bsm_construction);
}
```

Figure 25 : Extrait de règle de mapping pour le composant « Door ».

Ce module logiciel est structuré comme une agrégation de règles de projection qui paramètrent les instances du BSM avec l'information extraite de l'IFC. Il y a autant de classes que d'objets à lier vers le modèle de simulation. A titre d'exemple, l'extrait de code ci-dessus (figure 25) implémente une règle basique qui permet de mettre en correspondance deux propriétés de l'élément « IfcDoor » avec l'instance de l'objet BSM « bsm_door ». Le principe est le même pour toutes les entités définies dans notre MVD. Certaines règles peuvent néanmoins être plus complexe à mettre en œuvre.

II.3. Implémentation du modèle de données COMETH

L'étape suivante dans le développement de notre prototype a été l'implémentation du modèle de données du moteur de simulation COMETH. Pour la première version du

prototype, nous avons considéré des hypothèses simplificatrices et visé une simulation en mode passif. On ne prend donc pas en compte les composants CVC, mais uniquement les éléments géométriques du modèle et leurs propriétés thermiques.

Le diagramme de la figure 26 affiche une version simplifiée la structure de données COMETH. On voit qu'un projet est composé d'un ensemble de bâtiments et qu'un bâtiment est composé d'un ensemble de zones. Une zone est définie selon son usage et elle est composée par un ensemble de groupes. Ce dernier représente une unité thermique homogène et contient un ensemble de parois opaques, de baies vitrées et des ponts thermiques. Un groupe est aussi associé à une inertie et une perméabilité.

On pourra noter que l'approche de modélisation de COMETH diffère légèrement de celles suivies par les autres outils de simulation thermique dynamique (par exemple, EnergyPlus). En effet, la plupart des outils sont basés sur une division du bâtiment en étages, puis en zones thermiques.

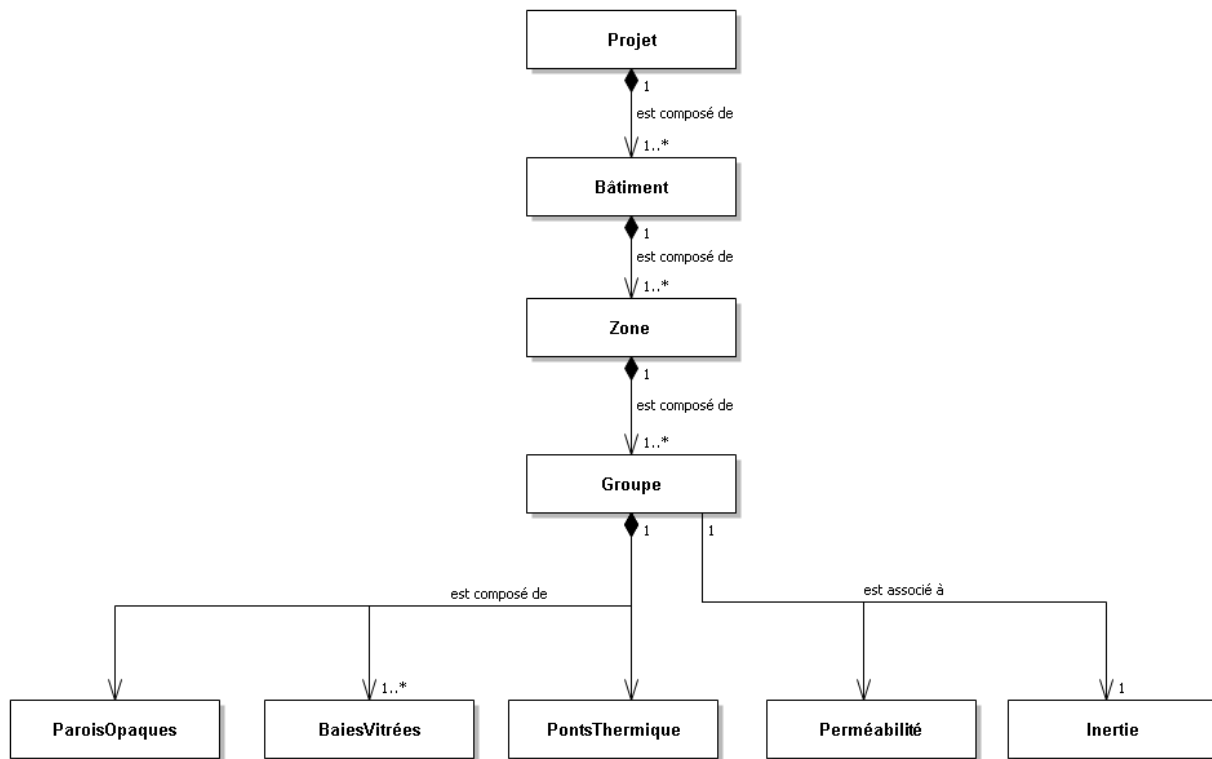


Figure 26 : Diagramme de classes du modèle de données COMETH pour la simulation en mode passif.

Au niveau du transfert de données, COMETH prend en entrée un document XML afin de configurer le bâtiment et la simulation. Les caractéristiques de ces fichiers d'entrée XML sont spécifiées dans un fichier dédié, le schéma XSD (le méta-modèle du fichier

XML). Nous avons pu implémenter le modèle de données COMETH en nous basant sur ce fichier XSD.

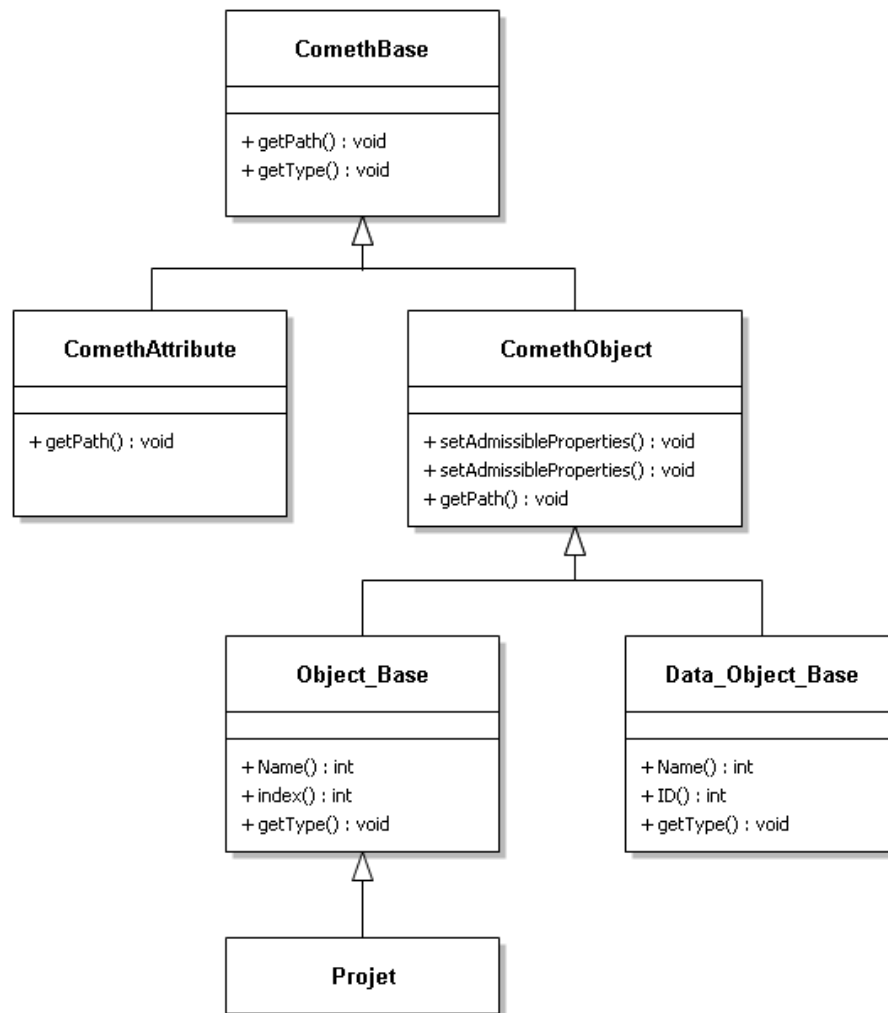


Figure 27 : Classes racines des projets de simulation COMETH.

Dans le but d'avoir un modèle extensible, et en prévision de nouvelles versions du moteur de simulation, nous avons implémenté le modèle de COMETH de façon à le rendre flexible – pour cela, nous nous sommes basés sur l'utilisation de classes abstraites. Ces dernières sont des classes qui ne peuvent être instanciées directement, et sont souvent partiellement définies. Elles sont destinées à être étendues par des classes héritières.

La Figure 27 représente le diagramme de classes issu du modèle de données COMETH : on retrouve *ComethBase*, qui contient les informations de base de COMETH. De cette classe en dérivent deux autres *ComethAttribute* et *ComethObject*, qui contiennent les opérations que l'on peut appliquer à tous les objets de COMETH. La classe

Object_Base dérive de *ComethObject* et contient les attributs communs à toutes les instances d'objet de COMETH (on voit que la classe *Projet* hérite de la classe *Object_Base*). La suite de l'arborescence est visible en Figure 26.

II.4. Implémentation de la traduction BSM vers COMETH

Pour réaliser la projection entre la structure de données du BSM et le modèle de données COMETH, il est nécessaire de définir des règles de correspondance (Wimmer et al [129]). Ces règles permettent la traduction du contenu BSM en une représentation COMETH. Elles relient les objets et les paramètres du BSM avec les données d'entrée du moteur de simulation.

Ces règles peuvent être triviales (typiquement bijectives) ou non. Nous en avons défini trois catégories (voir figure 28) qui sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

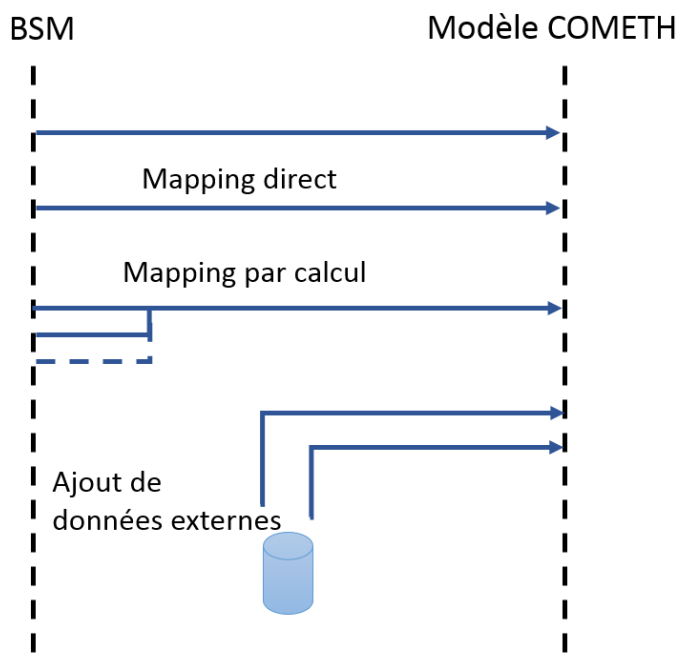


Figure 28 : Les trois principales règles de mapping de BSM vers COMETH.

II.4.1. Mapping direct

La première catégorie de règles concerne la mise en correspondance « *mapping* » direct d'un ou plusieurs éléments vers un ou plusieurs éléments. Elle décrit une cartographie des objets ou paramètres identiques (par exemple le paramètre décrivant l'efficacité d'une chaudière, qui est tout autant valide dans le BSM que dans COMETH). On peut distinguer trois règles différentes dans le cas où le mapping se fait de - ou bien - vers un ou plusieurs éléments :

- mapping One to One : un seul paramètre ou un composant de BSM est transformé en un autre paramètre ou un composant de COMETH.
- mapping Many to One : plusieurs paramètres ou composants BSM sont convertis en un paramètre ou composant de COMETH.
- mapping One to Many : un seul paramètre ou composant BSM est converti en plusieurs paramètres ou composants COMETH.

II.4.2. Mapping par calcul

La deuxième catégorie de règle concerne le calcul de nouvelles valeurs en utilisant les valeurs existantes du BSM, comme par exemple pour le calcul des surfaces. Dans ce cas, des paramètres ou composants du BSM donnent lieu à la création d'un ou plusieurs éléments différents dans COMETH.

II.4.3. Ajout de données externes

La troisième catégorie de règle porte sur la création d'objets ou de paramètres manquants dans le BSM. Il serait en effet contradictoire de viser à obtenir un modèle pivot générique à travers le BSM, tout en incluant dans ce dernier l'ensemble des informations pour l'ensemble des moteurs de simulation visés. La généricité a un prix, celui de l'incomplétude : le BSM ne peut contenir l'ensemble des données nécessaires aux moteurs visés. Il sera dès lors nécessaire, pour toute connexion entre le BSM et un moteur de simulation spécifique, d'ajouter ces éléments manquants dans la phase de connexion BSM – moteur de simulation. Un exemple est celui de la notion de groupe dans COMETH, qui n'existe pas dans le BSM. Ceci s'applique également aux paramètres liés à l'exécution de la simulation.

II.4.4. Résumé sur les règles de correspondances

Le tableau 13 suivant résume les trois catégories de règles implémentées avec un exemple pour chaque type de règle.

La définition de ces règles de projection est une étape cruciale, car il est nécessaire d'avoir une compréhension fine de la définition de tous les objets et paramètres pertinents dans les deux domaines. Nous avons également pu constater que la définition de ces règles pour un nouveau moteur cible imposait de revoir et potentiellement d'adapter le BSM – d'où la nécessité accrue de pouvoir modeler et adapter de façon itérative le BSM.

Type de règle		Exemple
Mapping direct	One to One : Un mapping direct d'un paramètre ou d'un composant à l'autre. Cette règle s'applique à tous les composants présents dans BSM et COMETH avec une correspondance directe	Par exemple le Building dans BSM correspond à Bâtiment. Ou encore le paramètre d'usage dans la zone de COMETH correspond à IfcSpace → Pset OccupancyType
	Many to One: Correspondance de plusieurs paramètres/composants à un seul paramètre/composante	Plusieurs Murs « Wall » dans BSM peuvent être simplifiés en un seul Mur « paroi opaque » dans COMETH
	One to many : Un seul paramètre/composant qui peut être déduit de plus d'un paramètre / composant	« Space » dans BSM peut correspondre à plusieurs « Groupe » dans COMETH
Mapping par calcul	Représentation différente d'un paramètre / composant dans BSM, y compris les algorithmes pour calculer le paramètre/composant sur COMETH	Le calcul de la surface SHON dans COMETH est la somme des surfaces des planchers de chaque niveau (IfcStorey) moins tout ce qui n'est pas aménageable
Ajout de données externes	L'absence de données dans le BSM pour représenter un paramètre/composant sur COMETH	La perméabilité du « Groupe » n'est pas représentée dans le BSM, et il a fallu l'ajouter

Tableau 13 : Les trois catégories de règles de projections.

II.5. Résultats des tests

Nous rappelons que nous avons implémenté le modèle de données COMETH en nous basant sur le schéma XSD. Le schéma XSD spécifie le contenu des fichiers XML qui y seront conformes. C'est en quelque sorte un méta-modèle des fichiers d'entrée. Dans le cadre de la validation de notre outil, nous avons donc vérifié que le XML généré était conforme au schéma XSD initial. L'analyse du fichier XML généré a été effectuée dans un premier temps manuellement : nous avons vérifié que l'ensemble des champs nécessaires étaient présents et conformes aux valeurs spécifiées, ce qui était bien le cas. Nous avons

noté au passage que le niveau de détails de l'information présente dans le fichier d'entrée de COMETH était moindre que celui du fichier IFC source.

Nous avons ensuite été en mesure de calculer le BBio (i.e le coefficient de la RT2012 représentant les caractéristiques thermiques du bâtiment en mode passif – voir l'annexe I pour plus de détails). Le BBio va caractériser l'efficacité énergétique du bâtiment sur la base des caractéristiques de la construction : la situation, la surface, la forme, l'orientation, l'éclairage naturel, l'isolation thermique, l'ouverture des baies et l'inertie.

```
_mProjet.Simu.Mode = new RT2012.Entree.Eex.E_Mode_de_calcul();
string l_mode_calcul = _mProjet.Simu.Mode.ToString();

if (_mProjet.Simu.Mode == RT2012.Entree.Eex.E_Mode_de_calcul.Th_B)
{
    RT2012.Sortie.RT_Data_Sortie_B.RT_Data_Sortie_Batiment_B_Collection _SortieBatiment =
        new RT2012.Sortie.RT_Data_Sortie_B.RT_Data_Sortie_Batiment_B_Collection();
    for (int i = 0; i < _Sortie.Data_Sortie_Batiment_B_Collection.Count; i++)
        Console.WriteLine("Résultat (" + l_mode_calcul.Replace("_", "-") + ") : " +
            _Sortie.Data_Sortie_Batiment_B_Collection[i].O_Bbio_pts_annuel.ToString("0.00") + " Points\n");
}

else if (_mProjet.Simu.Mode == RT2012.Entree.Eex.E_Mode_de_calcul.Th_C)
{
    for (int i = 0; i < _Sortie.Data_Sortie_Batiment_C_Collection.Count; i++)
        Console.WriteLine("Resultat (" + l_mode_calcul.Replace("_", "-") + ") : " +
            _Sortie.Data_Sortie_Batiment_C_Collection[i].O_Cep_annuel.ToString("0.00") + " kWh/m2/An\n");
}
```

Figure 29 : Extrait de code pour le calcul du BBio.

La figure 29 est un extrait du code du calcul de l'efficacité énergétique du modèle de bâtiment testé. Le mode de calcul qui concerne notre application est le TH_B permettant le calcul du BBio (voir annexe I). Suite à l'exécution du prototype développé sur la base du fichier d'entrée généré, le BBio calculé était bien conforme à celui évalué en amont à l'aide des propriétés thermiques du bâtiment.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le prototype développé pour l'interconnexion du modèle de bâtiment décrit en IFC avec COMETH. Ce dernier s'appuie sur un modèle de données intermédiaires, le BSM, qui en se basant sur deux modules de conversion, extrait les données fournies par le BIM et les enrichit avec les données nécessaires pour exécuter une simulation avec COMETH.

À noter que la connexion entre l'IFC et COMETH par l'intermédiaire du BSM a nécessité de mettre en place une base de règles de mapping, dont certaines pouvaient être relativement complexes. C'est la combinaison de cette base de règles et du BSM qui permet d'assurer la flexibilité de l'outil. Le prise en compte d'un moteur de simulation additionnel reposera en effet sur les étapes suivantes : analyse des exigences du moteur ciblé ; revue

du BSM pour vérifier qu’il couvre ces exigences ; extension de la base de règles pour permettre la génération des données d’entrée du moteur ciblé depuis le BSM ; enfin, si et seulement si l’étape précédente ne permet pas de couvrir l’ensemble des besoins, extension du BSM.

Dans le prochain chapitre, nous allons résumer l’ensemble des travaux effectués, synthétiser les apports de la solution proposée, et décrire les perspectives de notre travail de thèse.

Chapitre 6 Conclusions et perspectives

Nous avons développé en introduction de ce document les motivations qui ont conduit à la réalisation de ce travail de thèse. Elles se basent sur un constat : celui de la nécessité d'une plus grande interopérabilité des outils numériques pour la conception et le cycle de vie du bâtiment. En effet, si les pratiques de conception du bâtiment ont évolué de façon importante avec la généralisation des supports logiciels (en particulier les outils de CAO et les outils de simulation), si les bénéfices liés à l'utilisation de ces outils sont désormais reconnus, et bien que l'offre se soit considérablement enrichie, il est encore difficile de mettre en œuvre un processus de conception numérique totalement connecté, où l'information de conception est itérativement raffinée de façon collaborative par l'ensemble des acteurs. L'un des principaux obstacles à la concrétisation d'un cycle de vie connecté et collaboratif est la multiplicité des acteurs impliqués, et de façon connexe, l'hétérogénéité des outils, formats et modèles utilisés.

En introduction, nous avons vu que le BIM (Building Information Model), ou maquette numérique, apporte une partie de la réponse à ce problème. Le BIM a en effet vocation à rassembler l'ensemble de l'information de conception et à constituer un référentiel partagé par l'ensemble des acteurs du cycle de vie. La généralisation du BIM est donc le préalable d'une conception numérique collaborative fiable et productive. Cette conclusion est largement partagée : ce n'est plus l'utilisation du BIM fait désormais l'objet d'un questionnement, mais les modalités de sa mise en œuvre. Sur cette question, la communauté semble reconnaître la nécessité de se baser sur un modèle de données (et formats associés) pour le BIM standard, neutre et ouvert, qui servira de référentiel à l'ensemble du support numérique du cycle de vie.

Nous avons également vu, dans les deux premiers chapitres, que le standard IFC (Industry Foundation Classes, proposé par le consortium buildingSMART) est sans aucun doute le meilleur candidat actuel pour constituer ce référentiel commun. L'IFC est à la fois un modèle de données orienté objet, généraliste, pour la conception numérique du bâtiment, et un ensemble de formats de données (step21, ifcXML) pour l'échange de données numérique. L'IFC fait l'objet d'une large reconnaissance dans la communauté (utilisateurs et éditeurs logiciels). En particulier, de nombreux outils (CAO, simulation notamment) disposent désormais de fonctionnalités d'import et d'export de l'IFC et le modèle est suffisamment riche pour que l'on puisse exprimer une grande part de l'information de conception. On pourrait donc penser que l'utilisation de l'IFC répond à la problématique posée.

Ce n'est pourtant pas complètement le cas. Comme on l'a vu en chapitre 2, l'IFC n'apporte qu'une réponse partielle, principalement en raison des limitations suivantes :

- l'IFC étant par vocation un langage généraliste, il n'est pas en mesure de couvrir l'ensemble des concepts spécifiques aux applications métiers. En particulier, dans le cas de la simulation énergétique, l'IFC ne permet pas de modéliser la totalité des systèmes HVAC et leurs propriétés ;
- le support offert pour l'IFC par les outils CAO (export) et les outils d'analyse (import) est limité (parfois inexistant) et de fiabilité variable. Cela s'applique en particulier à la simulation énergétique.

Suivant ces observations, l'objectif de cette thèse était de contribuer à l'amélioration de l'interopérabilité au sein du cycle de vie du bâtiment, avec un point focal sur la phase de conception, et plus particulièrement sur le lien entre les outils de conception (CAO) et les outils d'analyse (simulation). Nous avons souhaité en particulier définir un ensemble de propositions cohérentes permettant de faciliter et fiabiliser le lien entre la conception (BIM) et la simulation énergétique. Nous pensons en effet que la dimension énergétique est structurante en raison de la prépondérance des aspects environnementaux dans les enjeux contemporains.

Nous avons choisi, sur la base de notre état de l'art, de focaliser notre travail sur le standard IFC, qui est le seul modèle de données neutre, ouvert pour le BIM et reconnu au plan international. Concernant la simulation, nous avons choisi de viser la classe d'outils la plus largement utilisée pour l'analyse énergétique : les outils de simulation thermique dynamiques, qui permettent de calculer l'évolution thermique du bâtiment en fonction des données environnementales, d'usage et des propriétés thermiques de l'enveloppe du bâtiment et des systèmes. Notre but a donc été de contribuer à la mise en œuvre d'un lien fiable et efficace entre le BIM IFC et la simulation thermique dynamique.

Pour cela, notre proposition s'est construite autour de trois contributions complémentaires :

- une spécification fine et structurée de l'interconnexion entre le BIM (format IFC) et la simulation thermique dynamique sur la base d'outils méthodologiques proposés par le consortium building Smart IDM/MVD ;
- la définition d'une approche de connexion BIM/simulation énergétique générique basée sur l'utilisation d'un modèle pivot le BSM, issue d'une analogie avec le domaine du Model-Driven Engineering (MDE) ;
- le prototypage et la validation d'un outil logiciel pour la mise en œuvre d'un processus automatisé de traduction IFC – simulation thermique.

Nous donnons la synthèse de ces contributions dans la section suivante et présentons ensuite les limites et perspectives de ce travail.

I. Synthèse des contributions

Ce document a débuté par une introduction du contexte des outils BIM et la problématique de conception collaborative. Nous avons également mis en avant le rôle important de la simulation énergétique dans la phase de conception du bâtiment et pointé les limites des outils numériques pour la conception du bâtiment sur la question de l'interopérabilité entre modèles hétérogènes, en particulier pour le cas de la simulation énergétique.

Notre analyse s'est poursuivie dans le chapitre 2, avec un état de l'art sur le BIM et sur l'interopérabilité dans le BIM, ainsi qu'une synthèse des limites et les solutions proposées pour y remédier. La solution la plus prometteuse pour assurer l'interopérabilité, d'après cet état de l'art, est de s'appuyer sur un format ouvert et partagé. Sur ce point, l'IFC semble être le seul candidat crédible, mais il reste des obstacles majeurs pour que son potentiel de support numérique partagé soit pleinement réalisé. En particulier, notre analyse montre que pour réaliser une connexion entre le BIM IFC et la simulation énergétique, il est nécessaire de mieux spécifier et structurer le processus en lien, et que pour ce faire, le plus pertinent est de s'appuyer sur les mécanismes et outils standards issus de buildingSMART (en particulier l'IDM, Information Delivery Manual, et le MVD, Model View Definition).

Ces travaux sont développés dans le chapitre 3 dans lequel nous avons étudié en détails le lien entre le BIM et la simulation. Nous avons étendu l'analyse de l'état de l'art afin d'identifier les sources des problèmes d'interconnexion entre les outils BIM et d'analyse de l'énergie. Nous avons identifié deux questions clefs : la spécification du processus de traitement de l'information, depuis le BIM vers la simulation, et la caractérisation des données pertinentes dans le modèle IFC. Notre but a donc été non seulement de mieux spécifier le processus de transformation de l'information issue du BIM mais également d'être en mesure de spécifier et extraire du modèle IFC les éléments d'intérêt pour constituer le modèle d'entrée de l'application de destination. Le premier point a été traité au travers de l'utilisation de l'IDM, qui permet de spécifier les échanges d'information envisagés avec précision.

Le deuxième point a été traité en utilisant le MVD, qui permet de représenter l'information à extraire de l'IFC. De cette sorte, on évite d'alourdir le modèle IFC tout en facilitant l'extraction de l'information pertinente. Nous nous sommes appuyés dans cette étude sur l'outil de simulation COMETH (outil de simulation réglementaire de la RT2012 développé par le CSTB), mais les conclusions peuvent être généralisées à d'autres outils. Notre travail montre en effet que l'utilisation combinée de l'IDM et du MVD offre un appui

efficace à la mise en œuvre du processus visé. Cela nous a également permis de raffiner les spécifications en lien avec nos deux autres contributions, sur la conception d'un modèle pivot et le développement d'un prototype d'outil logiciel pour la traduction IFC-Simulation. Ce travail nous a également permis de confirmer les limites de l'IFC sur l'expression des concepts et propriétés propres à la simulation thermique ainsi que la nécessité d'enrichir l'information issue de l'IFC, avant de générer les modèles de l'outil de simulation visé. Une solution prometteuse, qui ne nécessite pas d'opérer des modifications sur le modèle IFC, consiste à recourir à un modèle intermédiaire agissant comme un pivot entre le BIM IFC et l'outil de simulation.

Ce dernier point constitue l'objet de notre deuxième contribution, qui a été développée dans le chapitre 4. Sur la base d'une analogie avec les concepts issus de l'ingénierie dirigée par les modèles, nous avons proposé une mise en application de l'approche MDA (Model-Driven Architecture) en conception numérique du bâtiment. Le principe est de s'appuyer sur un « Building Simulation Model » (par analogie avec le PIM, « Platform-Independent Model », du MDA) qui opère la jonction entre l'IFC et la simulation. Le BSM a pour vocation de capitaliser l'information nécessaire à la simulation, mais d'une façon non spécifique à l'outil (aux outils) visé(s). Ainsi, on peut générer à partir du BSM plusieurs PSM (« Platform-Specific Model ») qui sont spécifiques aux outils visés. Le BSM que nous avons défini permet de modéliser à la fois les caractéristiques géométriques du bâtiment avec ses systèmes et leurs caractéristiques. Il a été conçu pour être évolutif, ce qui permet de l'étendre itérativement. Ce BSM constitue un apport important de cette thèse : ce modèle facilite de façon significative l'échange de données entre les modèles BIM et les modèles des moteurs de simulation.

Enfin, une partie importante de ce travail de thèse a porté sur la conception et le développement d'une preuve de concept. Ce point est traité dans le chapitre 5, où nous avons présenté le prototype développé pour l'interconnexion du modèle de bâtiment décrit en IFC avec COMETH. Ce prototype est basé sur le BSM, qui met en relation les données fournies par le BIM et celles nécessaires à l'exécution d'une simulation. L'outil développé inclut une base de règles de traduction depuis le BSM vers le modèle de données spécifique à l'outil de simulation. Le prototype a été testé avec succès sur un cas d'application portant sur la simulation d'une maison individuelle en mode passif.

Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications et ont permis la participation à plusieurs conférences :

Articles de journaux

- Emira El Asmi, Sylvain Robert, Benjamin Haas, Khaldoun Zreik. A Standardized Approach to BIM and Energy Simulation Connection. *International Journal of Design Sciences and Technology*, Volume 21 (1), 2015.

- Davide Mazza, Emira El Asmi, Sylvain Robert, Khaldoun Zreik. A model-based approach to the integration of BIM and simulations. (En rédaction, soumission au journal « *Energy & Buildings* » prévue en mars 2016).

Actes de conférences

- Emira El Asmi, Sylvain Robert, Davide Mazza, Khaldoun Zreik. Multi-physical Model Simulation and Interoperability through BIM/IFC using COMETH Simulation Engine. EuropIA.2014: *14th International conference on the Advances in Design Sciences and Technology*, Nice, France.
- Emira El Asmi, Sylvain Robert, Bruno Hilaire, Khaldoun Zreik. Leveraging Building Design Model From Energy Performance Model: From An IFC/BIM To Cometh Simulation Engine. *14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, Hyderabad, India, 2015.

II. Discussion

Les contributions de cette thèse apportent des premières réponses à la problématique visée, mais présentent certaines limites que nous analysons dans cette partie. Les perspectives sont développées dans la section suivante.

Notre première contribution a porté sur la modélisation du processus d'échange de données à l'aide de l'IDM et la définition du MVD IFC. Ce travail a non seulement permis d'identifier le sous-ensemble de l'IFC utile à la simulation, mais a également servi de base à la conception de notre modèle pivot, le BSM. Par ailleurs, le diagramme de description du processus (*workflow*) issu de l'IDM clarifie le séquençement des activités nécessaires à la réalisation de la connexion BIM IFC – Simulation et les schémas collaboratifs en lien. Les échanges de données sont également précisés par les *Exchange Requirements* issus de ce travail. Cette mise en application des outils méthodologiques liés à l'IFC a permis de confirmer leur pertinence pour notre problématique et de poser les bases nécessaires à la réalisation des contributions suivantes. On peut cependant noter deux points pour lesquels des améliorations sont possibles. En premier lieu, la modélisation du processus (*Process map*) reste basique : elle inclut seulement trois acteurs, auxquels sont associés un nombre réduit d'activités et nœuds de décision. Cela est volontaire, car nous voulions garantir la généricité de la modélisation réalisée. Cependant, si l'on souhaite retirer l'ensemble des bénéfices de l'application de l'IDM sur un cas d'entreprise réel, il serait souhaitable de donner plus de détails sur les acteurs, les activités et les flux d'information. On pourrait alors visualiser et analyser finement les processus collaboratifs, comprendre les dépendances entre activités, identifier les possibles goulets d'étranglement sur la transmission de l'information, et adapter ces processus afin d'améliorer l'efficacité de la conception. Une deuxième limite de ce travail porte sur la prise en compte des systèmes

de CVC, qui n'est pas complète. Nous nous sommes limités aux systèmes les plus courants, mais n'avons pu être exhaustifs sur ce point.

Notre deuxième contribution a porté sur la définition d'un modèle pivot entre l'IFC et la simulation, que nous avons appelé le BSM (Building Simulation model). Le BSM permet non seulement de faire le lien entre la conception et la simulation, mais également de mieux capitaliser l'information de conception. La principale limite de nos travaux porte, là encore, sur le spectre des systèmes de CVC traité, qui ne couvre que les systèmes les plus courants. Par ailleurs, nous regrettons de n'avoir pas été en mesure de pousser plus avant l'analogie entre le domaine du MDE (Model-Driven Engineering) et celui de la conception numérique du bâtiment. Nous sommes en effet convaincus que le MDE a conceptualisé des questions pertinentes pour la conception numérique du bâtiment – nous pensons en particulier à la transformation de modèles, qui porte sur les approches facilitant la traduction de l'information entre domaines hétérogènes.

Enfin, notre troisième contribution a porté sur la conception et le développement d'un prototype logiciel permettant d'automatiser la traduction IFC – Simulation. Ce prototype logiciel intègre une implémentation du BSM, et réalise les deux phases de la traduction IFC – BSM et BSM – Simulation. Il est opérationnel et a été testé avec succès sur un cas test. Cependant, des évolutions peuvent être nécessaires. Sur le périmètre fonctionnel, tout d'abord : le prototype actuel ne permet de cibler que des simulations en mode passif, c'est-à-dire ne prenant pas en compte les scénarios d'usage et le fonctionnement des systèmes du bâtiment. En particulier, l'outil ne permet pas de générer des fichiers pour le calcul du coefficient Cep (voir l'annexe I) représentant les consommations de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire et d'éclairage du bâtiment. Le cas test actuel porte sur un modèle IFC de maison individuelle, et ne couvre pas l'ensemble du mapping IFC - COMETH réalisé dans le cadre de l'IDM. En particulier, le modèle IFC de la maison test n'est pas assez riche géométriquement. Il serait donc souhaitable d'étendre les tests à des cas plus complexes et pour différents types de simulation.

III. Perspectives

Le travail réalisé durant cette thèse nous a permis de défricher un sujet qui recèle des perspectives importantes.

Tout d'abord, pour ce qui concerne l'IDM et la modélisation des processus (*Process Map*), une perspective possible est d'enrichir la modélisation afin de l'approcher de cas plus réalistes. Pour cela, il serait nécessaire de s'appuyer sur un partenariat avec une entreprise (typiquement un maître d'œuvre) et de mener des entretiens avec les acteurs impliqués dans les processus de conception. Un tel projet pourrait se heurter à l'impossibilité d'avoir accès à l'information : les processus de conception sont au cœur de

la valeur ajoutée de l'entreprise, et l'information en lien est en général non diffusable. Il constituerait cependant une extension bénéfique de nos travaux.

Une autre perspective serait d'étendre la couverture de notre *mapping* IFC – Simulation pour une meilleure prise en compte des systèmes CVC. Cela impliquerait de retravailler le mapping défini dans le cadre de l'IDM et d'enrichir le BSM.

En lien avec le point précédent, le BSM pourrait être complété pour étendre le spectre des moteurs de simulation traité – en veillant naturellement à ne pas impacter la généricité du BSM. Il est à noter qu'en l'état, le BSM permet déjà d'aborder deux outils : COMETH et EnergyPlus. Ces deux outils couvrent déjà une part importante des usages et il est probable que l'extension du BSM à d'autres outils ne nécessiterait pas de révisions majeures.

Ensuite, au plan de l'outillage, le prototype actuel doit être étendu pour une meilleure prise en charge des données liées au domaine de la CVC (chauffage, ventilation et climatisation). Ceci nécessite, en particulier pour l'outil COMETH, une plus large couverture de la réglementation thermique française RT2012 si l'on veut pouvoir viser une analyse complète des performances énergétiques du bâtiment avec le moteur de simulation. Ceci nécessiterait notamment de réviser et étendre la base de règles de traduction entre le BSM et la simulation et élargir les fonctionnalités de la partie de l'outil dédiée à l'instanciation du BSM depuis l'IFC.

Le cas de test utilisé reposant sur un modèle IFC d'une maison individuelle, une prochaine étape serait d'appliquer le prototype sur des cas plus complexes, incluant notamment une géométrie plus riche. Nous pourrions aussi envisager d'autres types de bâtiments, du secteur tertiaire notamment, étant donné que les besoins en chauffage et en refroidissement (et les caractéristiques des systèmes en lien) varient en fonction de l'usage et de la construction. Par exemple, dans la réglementation RT2012, au niveau d'une zone ou d'un groupe, l'usage détermine plusieurs paramètres tels que : la plage d'occupation, l'horaire de chauffage et climatisation, l'horaire d'éclairage, l'horaire de ventilation, etc.

Enfin, une perspective intéressante serait d'adjoindre à notre outil une interface utilisateur graphique, qui faciliterait son utilisation et permettrait de produire un démonstrateur plus visuel et accessible aux utilisateurs potentiels.

Références bibliographiques

- [1] Alycone simulation tool. Disponible sur <http://www.izuba.fr/logiciel/alcyone> [Consulté en Janvier 2016].
- [2] Comfie simulation tool. Disponible sur <http://www.izuba.fr/logiciel/comfie> [Consulté en janvier 2016].
- [3] Designbuilder simulation tool. Disponible sur <http://www.designbuilder.co.uk/>, [consulté en janvier 2016].
- [4] Google sketchup. Dispnable sur <http://www.sketchup.com/fr>, [consulté en janvier 2016].
- [5] Modelica by example. Disponible sur <http://book.xogeny.com/front/intro/> [Consulté le 09/08/2015].
- [6] Object management group. Disponible sur <http://www.omg.org/> [Consulté le 15/02/2016].
- [7] Projet ReDeFer. Disponible sur <http://rhizomik.net/html/redefer/> [Consulté le 09/08/2015].
- [8] Trnsys. Disponible sur <http://www.trnsys.com/features/>, [consulté en janvier 2016].
- [9] Unified Modeling Language UML. Disponible sur <http://www.uml.org/> [Consulté le 04/01/2016].
- [10] XML to RDF Converter. Disponible sur <http://rhizomik.net/html/redefer/xml2rdf/> [Consulté le 15/02/2016].
- [11] XSD to OWL Converter. Disponible sur <http://rhizomik.net/html/redefer/xsd2owl/> [Consulté le 15/02/2016].
- [12] F. H. Abanda, W. Zhou, J. H. M. Tah, and F. Cheung. Exploring the relationships between linked open data and building information modelling. In *The Sustainable Building Conference, Coventry University*, 2013.
- [13] F.H. Abanda, J.H.M. Tah, and R. Keivani. Trends in built environment semantic web applications: Where are we today ? *Expert Systems with Applications*, 40(14):5563 – 5577, 2013.
- [14] VA. ALEXANDRIA. The ifd library/idm/ifc/mvd workshop. Disponible sur https://www.nibs.org/?page=bsa_ifdlibrary [Consulté le 27/09/2015], April 2008.

- [15] V. Aram, C. Eastman, R. Sacks, I. Panushev, and M. Venugopal. Introducing a new methodology to develop the information delivery manual for aec projects. In *CIB W78, Cairo, Egypt*, 2010.
- [16] A.P. Arena and C. de Rosa. Life cycle assessment of energy and enviromental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in mendoza argentina. *Building and Environment*, 38(2):359–368, 2003.
- [17] Emira El Asmi, Sylvain Robert, David Mazza, and Khaldoun Zreik. Multi-physical Model Simulation and Interoperability through BIM/ IFC using COMETH Simulation Engine. In Khaldoun Zreik, editor, *Architecture, City & Information Design, Nice, France*, 2014.
- [18] Shady Attia. State of the art of existing early design simulation tools for net zero energy buildings: A comparison of ten tools. Technical report, 2011.
- [19] Autodesk. Autocad website. Disponible sur <http://www.autodesk.fr/products/autocad/overview> [Consulté le 01/02/2016].
- [20] Autodesk. Building information modelling for sustainable design. Technical Report 3/4, Autodesk Revit white paper, 2005.
- [21] Autodesk. Revit | building design and construction | autodesk. Disponible sur <http://www.autodesk.com/products/autodesk-revit-family/features>, 2013.
- [22] S. Azhar. Building information modeling (bim): Trends, benefits, risks, and challenges for the aec industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3):241–252, 2011.
- [23] Z. Aziz, C.J. Anumba, D. Ruikar, P. Carrillo, and D. Bouchlaghem. Intelligent wireless web services for construction - a review of the enabling technologies. *Automation in Construction*, 15(2):113 – 123, 2006.
- [24] Y.C. Huang B. Dong, K.P. Lam. A comparative study of the ifc and gbxml informational infrastructures for data exchange in computational design support environments. In *Proceedings of Building Simulation 2007: 10th Conference of International Building Performance Simulation Association, Beijing, China*. IBPSA Building Simulation Conference, 2007.
- [25] Yudi Nugraha Bahar, Christian Pere, Jérémie Landrieu, and Christophe Nicolle. A thermal simulation tool for building and its interoperability through the building information modeling (bim) platform. *Buildings*, 3:380–398, 2013.
- [26] Davide Bavastro, Alfonso Capozzoli, Vincenzo Corrado, Matteo Del Giudice, Anna Osello, Laura Rietto, and Elisa Vigliani. From the architectural model to the energymodel: The use of bim for the evaluation of the energy performance of buildings. In *Proceeding of Building Simulation and 2014 Optimization*, editors, *Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France*, 2014.

- [27] V. Bazjanac. Acquisition of building geometry in the simulation of energy performance. In *Building Simulation 2001, 7th International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, 2001*.
- [28] V. Bazjanac. Space boundary requirements for modeling of building geometry for energy and other performance simulation. In *CIB W78: 27th International Conference. Cairo, Egypt, 2010*.
- [29] Vladimir Bazjanac. Impact of the U.S. National Building Information Model Standard (NBIMS) on Building Energy Performance Simulation. In *International Building Simulation Conference 2007, Beijing, China, 2007*.
- [30] Vladimir Bazjanac and Tobias Maile. IFC HVAC interface to EnergyPlus - A case of expanded interoperability for energy simulation. In *SimBuild 2004, Boulder, CO, 08/2004 2004*.
- [31] Havard Bell and Lars Bjorkhaug. A buildingSMART ontology. Technical report, buildingSMART, 2006.
- [32] Tim Berners-lee, Yuhsin Chen, Lydia Chilton, Dan Connolly, Ruth Dhanaraj, James Hollenbach, Adam Lerer, and David Sheets. Tabulator: Exploring and analyzing linked data on the semantic web. In *In Proceedings of the 3rd International Semantic Web User Interaction Workshop, ISWC2006, Athens, GA, November 2006*.
- [33] J Bettin. Knowledge industry survival strategy initiative. Disponible sur <http://www.industrialized-software.org/kiss-initiative> [consulté le 01/12/2015], January 2009.
- [34] J. Bezivin and O. Gerbe. Towards a precise definition of the omg/mda framework. In *Automated Software Engineering (ASE 2001)*, 2001.
- [35] Michel Böhms and Peter Bonsma. Semantic product modelling and configuration: Challenges and opportunities. *Journal of Information Technology in Construction*, 14:507–525, 2009.
- [36] J. Bhogal, A. Macfarlane, and P. Smith. A review of ontology based query expansion. *Inf. Process. Manage.*, 43(4):866–886, July 2007.
- [37] Bizagi. Business process management (bpm) solutions. <http://www.bizagi.com/>.
- [38] Lars Bjorkhaug and Havard Bell. IFD Library for buildingSMART: IFD In A Nutshell. Diponible sur <http://www.ifd-library.org/building-smart-ifd/> [Consulté le 04/03/2014].
- [39] RT Bâtiment. Les économies d'énergie dans le bâtiment. Disponible sur <http://www.rt-batiment.fr/> [Consulté le 02/01/2016].
- [40] BuildingSmart. Ifcpropertyset definition. Disponible sur <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/ifckernel/lexical/ifcpropertyset.htm> [Consulté le 05/02/2014].
- [41] BuildingSmart. Ifcproxy definition. Disponible sur <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/ifckernel/lexical/ifcproxy.htm> [Consulté le 05/02/2014].

- [42] BuildingSmart. Ifcrelationship definition. Disponible sur <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC2x3/TC1/html/ifckernel/lexical/ifcrelationship.htm> [Consulté le 05/02/2014].
- [43] buildingSmart. Terms and definitions. Disponible sur <http://www.buildingsmart.org/resources/terms-and-definitions> [Consulté le 23/06/2014].
- [44] buildingSMART. Ifc 4 officially released. Disponible sur <http://www.buildingsmart-tech.org/news/ifc4-officially-released>. [Consulté le 02/05/2014], 2013.
- [45] buildingSMART Finland. Common bim requirements 2012- series 10 energy analysis. Disponible sur http://files.kotisivukone.com/en.buildingsmart.kotisivukone.com/COBIM2012/cobim_10_energy_analysis_v1.pdf, 2012.
- [46] J. Cao, T. Maile, J. O'Donnell, R. Wimmer, and C. van Treeck. Model transformation from simmodel to modelica for building energy performance simulation. In *BauSIM2014, Aachen, Germany*, 2014.
- [47] J. Cheng and K.H. Law. Using process specification language for project information exchange. In *The 3rd International Conference on Concurrent Engineering in Construction, Berkley, CA*, 1- 2 July 2002.
- [48] Min Seok Choi, Sa Kyum Kim, and Seung Ho Ryu. Case studies for the evaluation of interoperability between a bim based architectural model and building performance analysis programs. In *Building Simulation Conference*, 2011.
- [49] Cplusplus. C++ language tutorial. Disponible sur <http://www.cplusplus.com/doc/tutorial/> [Consulté le 01/10/2015].
- [50] Drury B. Crawley, Jon W. Hand, Michael Kummert, and Brent T. Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4):661 – 673, 2008. Part Special: Building Performance Simulation.
- [51] Drury B. Crawley, Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, W.F. Buhl, Y. Joe Huang, Curtis O. Pedersen, Richard K. Strand, Richard J. Liesen, Daniel E. Fisher, Michael J. Witte, and Jason Glazer. Energyplus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4):319 – 331, 2001.
- [52] CSTB. Cometh l'outil ouvert de simulation énergétique dynamique du cstb, 2015.
- [53] Michael Dibley, Haijiang Li, Yacine Rezgui, and John Miles. An ontology framework for intelligent sensor-based building monitoring. *Automation in Construction*, 28(0):1 – 14, 2012.
- [54] C. Eastman, F. Wang, S. J. You, and D. Yang. Deployment of an AEC industry sector product model. *Computer Aided Design*, 37(12):1214–1228, October 2005.
- [55] Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, and Kathleen Liston. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Wiley Publishing, 2008.

- [56] A. Ekholm. Harmonization of ISO 12006-2 and IFC – a necessary step towards interoperability. In *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction ECPPM 2004, Istanbul, Turkey*. Proceedings of the 5th European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Construction Industry - ECPPM, 2004.
- [57] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Méthode de calcul th-c-e ex. Technical report, 2008.
- [58] CSTB Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. evebim - viewer gratuit de maquette numérique du bâtiment. Disponible sur <http://editions.cstb.fr/Products/eveBIM-Viewer>.
- [59] CSTB Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Méthode de calcul th-bce 2012. Technical report, 2011.
- [60] L.H. Forbes and S.M. Ahmed. *Modern Construction: Lean Project Delivery and Integrated Practices*. CRC Press, 2011.
- [61] TUD Institut für Bauinformatik. Hesmos - ict platform for holistic energy efficiency simulation and lifecycle management of public use facilities. Technical report, Technische Universität Dresden, Available at: <http://hesmos.eu/index.php>., 2011.
- [62] Froese. Future directions for ifc-based interoperability. *ITcon Journal of information technology in construction*, 8:231–246, 2003.
- [63] B. Haas and P. Corrales. Solution pour l'interopérabilité avec COMETH. In *Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France*, 2013.
- [64] J.W. Hand, D.B. Crawley, M. Donn, and L.K. Lawrie. Improving the data available to simulation programs. In *Proceedings of Building Simulation 2005*, pages 373–380. IBPSA, 2005.
- [65] Robert J. Hitchcock and Justin Wong. Transforming ifc architectural view bims for energy simulation. In *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia*, 2011.
- [66] R. Howard and B.-C. Bjork. Building information modelling- experts views on standardisation and industry deployment. *Advanced Engineering Informatics*, 22(2):271–280, 2008.
- [67] I. Howell and B. Batcheler. Building information modeling two years later – huge potential, some success and several limitations. Disponible sur http://www.laiserin.com/features/bim/newforma_bim.pdf, 2005.
- [68] Bentley Systems Inc. Microstation website. <https://www.bentley.com/en/products/product-line/modeling-and-visualization-software/microstation>.

- [69] Bentley Systems Inc. Microstation products: Driving innovation across a comprehensive software portfolio. Disponible sur <http://www.bentley.com/enGB/Products/microstation+product+line> [Consulté le 12/01/2016], 2013.
- [70] U. Isikdag and J. Underwood. Two design patterns for facilitating building information model-based synchronous collaboration. *Automation in Construction*, 19(5):544–553, 2010.
- [71] ISO. *The EXPRESS language reference manual*. Disponible sur http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38047 [Consulté le 30/04/2014].
- [72] Valentina Janev and Sanja Vranes. Applicability assessment of semantic web technologies. *Inf. Process. Manage*, 47(4):507–517, July 2011.
- [73] Finith Jernigan. *Big Bim Little Bim: The Practical Approach to Building Information Modeling-integrated Practice Done the Right Way!* 4Site Press, 2007.
- [74] Frederic Jouault and Jean Bezivin. Km3: A dsl for metamodel specification. *Formal Methods for Open Object-Based Distributed Systems*, volume 4037 of Lecture Notes in Computer Science:171–185, 2006.
- [75] S. Junnila, A. Horvath, and A. Guggemos. Life cycle assessment of office bbuilding in europe and the united states. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(1):10–17, 2006.
- [76] Peter Katranuschkov, Matthias Weise, Ronny Windisch, Sebastian Fuchs, and Raimar J. Scherer. Bim-based generation of multi-model views. In *CIB Wo78 27TH International Conference, Cairo, Egypt*, 2010.
- [77] Jong Bum Kim, WoonSeong Jeong, Mark J. Clayton, Jeff S. Haberl, and Wei Yan. Developing a physical bim library for building thermal energy simulation. *Automation In Construction*, 50:16–28, 2015.
- [78] Sumedha Kumar. Interoperability between building information models (bim) and energy analysis programs. Master’s thesis, School of Architecture, 2008.
- [79] Mikael Laakso and Arto Kiviniemi. The ifc standard - a review of history, development and standardization. *ITcon Journal of information technology in construction*, 17:134–161, 2012.
- [80] Tuomas Laine, Reijo Hänninen, and Antti Karola. Benefits of bim in the thermal performance management. In *International Building Simulation Conference 2007, Beijing, China*, 2007.
- [81] B. Langroodi and S. Staub-French. *Change Management with Building Information Models: A Case Study*, chapter 119, pages 1182–1191. American Society of Civil Engineers, 2012.
- [82] LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). Simergy: Simergy Homepage. Disponible sur: <http://simergy.lbl.gov/> [Consulte le 04/11/2014], 2013.

- [83] NBS National BIM Library. National bim report 2013, building information modelling. Technical report, [Online]. Available at: www.thenbs.com/pdfs/NBS-NationalBIMReport2013-single.pdf, 2013.
- [84] NBS National BIM Library. Nbs national bim report 2015. Technical report, available on <https://www.thenbs.com/knowledge/nbs-national-bim-report-2015>, 2015.
- [85] T. Liebich, P. Katranushlov, M. Weise, and R. Guruz. Extending bim for multi-model domain tasks. In *ICT FOR SUSTAINABLE PLACES, Nice, France*, 2013.
- [86] Qiang Liu, Jian Ping Zhang, Ding Li, and Zhen Zhong Hu. Research on building information modeling and model transformation technology based on the ifc. In *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering ICCCBE, Moscow, Russia*, 2012.
- [87] Xuesong Liu. E+owl: A semantic web implementation of energyplus data model. Disponible sur <https://sites.google.com/site/lxspine/pine%27sresearch/eowl-a-semantic-web-implementation-of-energyplus-data-model>.
- [88] J. Lucas, T. Bulbul, and W. Thabet. A life cycle framework for using bim in healthcare facility management. In *Information technology for construction CIB W78–W102, Sophia Antipolis - France*, 2011.
- [89] A. Mahdavi, A. Anjomshoaa, G. Suter, and F. Shayeganfar. Implementation of an ifd library using semantic web technologies. In *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction ECPPM 2008, Valence, Spain*, 2008.
- [90] Tobias Maile, Martin Fischer, and Vladimir Bazjanac. Building energy performance simulation tools - a life-cycle and interoperable perspective. Technical report, CIFE - Center for Integrated Facility Engineering, 2007.
- [91] Christoph Merschbrock and Bjørn Erik Munkvold. A research review on building information modeling in construction-an area ripe for is research. *Communications of the Association for Information Systems*, 31:207–228, 2012.
- [92] P. Moakher and S. Pimplikar. Building information modeling (bim) and sustainability - using design technology in energy efficient modeling. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1(20):10–21, 2011.
- [93] Hyeun Jun Moon, Min Seok Choi, Sa Kyum Kim, and Seung Ho Ryu. Case studies for the evaluation of interoperability between a bim based architectural model and building performance. In *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, November 2011*.
- [94] MultimediaLab. Ifc to rdf conversion tool. Disponible sur <http://demo.mmlab.be/IFC-repo/>, <http://linkedbuildingdata.net/tools/tool-ifc-to-rdf-conversion-tool> [Consulté le 07/06/2014].

- [95] J. O'Donnell, R. See, C. Rose, T. Maile, V. Bazjanac, and P. Haves. Simmodel: A domain data model for whole building energy simulation. In *Proceedings of Building Simulation 2011*, page 382–389, 2011.
- [96] James T. O'Donnell, Tobias Maile, Cody Rose, Nataša Mrazovic, Elmer Morrissey, Cynthia Regnier, Kristen Parrish, and Vladimir Bazjanac. Transforming bim to bem: Generation of building geometry for the nasa ames sustainability base bim. Technical report, Berkley Lab, 2013.
- [97] US Department of Energy. Building energy software tools. Disponible sur <http://www.buildingenergysoftwaretools.com/> [Consulté le 03/01/2016].
- [98] US Department of Energy. Energyplus. Disponible sur <http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software/energyplus> [Consulté le 03/01/2016].
- [99] Object Management Group (OMG). MDA Guide Version 1.0.1. Technical report, Object Management Group, 2003.
- [100] Barry O'Sullivan and Marcus Keane. Specification of an ifc based intelligent graphical user interface to support building energy simulation. In *International Building Simulation Conference 2005, Montreal, Canada*, 2005.
- [101] Ivan Panushev, Charles Eastman, Rafael Sacks, Manu Venugopal, and Vahideh Aram. Development of the national bim standard (nbims) for precast/prestressed concrete. In *CIB Wo78 27TH International Conference: Applications in IT In the AEC Industry, Cairo, Egypt*, 2010.
- [102] Pauwels, Pieter, Van Deursen, and Davy. Ifc-to-rdf: adaptation, aggregation and enrichment. In *First International Workshop on Linked Data in Architecture and Construction*, pages 1–3, 2012.
- [103] S.S. Pimplikar and P. Esmaeili. Building information modeling (bim) and sustainability – using design technology in energy efficient modeling,. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, pages 10–21, 2012.
- [104] Michael J. Pratt. Introduction to iso 10303 - the step standard for product data exchange. Technical report, National Institute of Standards and Technology, 2011.
- [105] Sylvain Robert, Bruno Hilaire, Paul Sette, and Souheil SoubraSouheil Soubra. Paving the way for exhaustive and seamless bim-based building energy simulation. In *the 29th International Conference on Applications of IT in the AEC industry, Beirut, Lebanon*, 2012.
- [106] Sylvain Robert, Davide Mazza, Bruno Hilaire, Paul Sette, and Benoît Vinot. An approach to enhancing the connection between bim models and building energy simulation – hvac systems in the loop. In *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction ECPPM 2014, Vienna, Austria*, 2014.

- [107] A. N. Clark S. J. Mellor and T. Futagami. Guest editors' introduction: Model-driven development. *IEEE Software*, 20(5):14–18, 2003.
- [108] Open Green Building XML Schema. A building information modeling solution for our green world. Disponible sur www.gbxml.org [Consulté le 17/05/2014].
- [109] H. Schevers and R. Drogemuller. Converting the industry foundation classes to the web ontology language. In *International Conference on Semantics, Knowledge and Grid (SKG 2005)*, Beijing, China, pages 73–73, 2005.
- [110] Hans Schevers, John Mitchell, Paul Akhurst, David Marchant, Stuart Bull, Kevin McDonald, Robin Drogemuller, and Chris Linning. Towards digital facility modelling for sydney opera house using ifc and semantic web technology. *ITcon Journal of information technology in construction*, 12:347–362, 2007.
- [111] Weiming Shen, Qi Hao, Helium Mak, Joseph Neelamkavil, Helen Xie, John Dickinson, Russ Thomas, Ajit Pardasani, and Henry Xue. Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 24(2):196 – 207, 2010.
- [112] Si and Wang. Ifc-based construction engineering domain ontology development. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 6:06–20, 2012.
- [113] V. Singh, N. Gu, and X. Wang. A theoretical framework of a bim-based multidisciplinary collaboration platform. *Automation in Construction*, 20(2):134–144, 2011.
- [114] K. Snook. Drawing is dead – long live modelling. Disponible sur <https://www.bsria.co.uk/download/asset/long-live-modelling.pdf>, 2009.
- [115] NBIMS National BIM Standard. National bim standard purpose. Technical report, The US National Institute of Building Sciences, 2006.
- [116] James Steel, Robin Drogemuller, and Bianca Toth. Model interoperability in building information modelling. *Software and Systems Modeling*, 11(1):99–109, 2010.
- [117] A. Stumpf, H. Kim, and E. Jenicek. *Early Design Energy Analysis Using BIMs (Building Information Models)*, chapter 43, pages 426–436. 2009.
- [118] Igor Svetel and Milica Pejanovic. The role of the semantic web for knowledge management in the construction industry. *Informatica (Slovenia)*, 34(3):331–336, 2010.
- [119] Jochen Teizer, Manu Venugopal, and Charles M. Eastman. *An Ontological Approach to Building Information Model Exchanges in the Precast/Pre-Stressed Concrete Industry*, chapter 112, pages 1114–1123. Construction Research Congress 2012, 2012.
- [120] BEST Directory Building Energy Software Tools. Software listing. Disponible sur <http://www.buildingenergysoftwaretools.com/software-listing> [consulté le 26 janvier 2016].

- [121] TRNSYS. Trnsys 17, a transient system simulation program. Technical report, Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison and TRANSOLAR Energietechnik GmbH and CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment and TESS – Thermal Energy Systems Specialists.
- [122] Joselaine Valaski, Andreia Malucelli, and Sheila Reinehr. Ontologies application in organizational learning: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 39(8):7555 – 7561, 2012.
- [123] L.A.H.M. van Berlo, J. Beetz, P. Bos, H. Hendriks, and R.C.J. van Tongeren. Collaborative engineering with ifc: new insights and technology (ecppm 2012). In *Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2012, Reykjavik, Iceland*, 2012.
- [124] C. Van Treeck and E. Rank. Dimentional reduction of 3d building models using graph theory and its application in building energy simulation. *Engineering with Computers*, 23:109–122, 2007.
- [125] M. Venugopal, C. Eastman, R. Sacks, I. Panushev, and V. Aram. Engineering semantics of model views for building information model exchanges using ifc. In *Information technology for construction CIB W78, Sophia Antipolis - France*, 2010.
- [126] Jean-Christophe Visier and Emilien Paron. COMETH L’outil ouvert de Simulation Energétique Dynamique du CSTB. Technical report, CSTB, 2015.
- [127] M. Weise, T. Liebich, and J. Wix. Integrating use case definitions for ifc developments. In *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction ECPPM 2008, Valence, Spain*, 2008.
- [128] J Whyte, N Bouchlaghem, A Thorpe, and R McCaffer. From cad to virtual reality: modelling approaches, data exchange and interactive 3d building design tools. *Automation in Construction*, 10(1):43 – 55, 2000.
- [129] R. Wimmer, T. Maile, J. O’Donnell, J. Cao, and C. van Treeck. Data-requirements specification to support bim-based hvac definitions in modelica. In *BauSIM2014, Aachen, Germany*, 2014.
- [130] Jeffrey Wix. What is the ifc model? Technical report, Building Smart, 2010.
- [131] Wei Yan, Mark Clayton, Jeff Haberl, WoonSeong Jeong, Jong Bum Kim, Sandeep Kota, Jose Luis Bermudez Alcoce, and Manish Dixit. Interfacing bim with building thermal and daylighting modeling. In *Proceeding of Building Simulation 2013*, editor, *Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France*, 2013.
- [132] Yang. Ifc-compliant design information modelling and sharing. *ITcon Journal of information technology in construction*, 8:1–14, 2003.

- [133] Q.Z. Yang and Y. Zhang. Semantic interoperability in building design: Methods and tools. *Computer-Aided Design*, 38(10):1099 – 1112, 2006.
- [134] N. Young, Jones S., Bernstein H., and Gudgel J. The business value of bim: getting building information modeling to the bottom line. Technical report, McGrawHill Smart Market Report, 2009.
- [135] Anastasiya Yurchyshyna and Alain Zarli. An ontology-based approach for formalisation and semantic organisation of conformance requirements in construction. *Automation in Construction*, 18(8):1084 – 1098, 2009.
- [136] Jian Ping Zhang, Jia Riu Lin, Zhen Zhong Hu, and Fang Qiang nal. Research on idm-based bim process information exchange technology. In *14th International Confetrence on computing in Civil and Building Engineering ICCCBE, Moscow, Russia*, 2012.
- [137] Jiemin Zhang, April Webster, Michael Lawrence, Madhav Nepal, Rachel Pottinger, Sheryl Staub-French, and Melanie Tory. Improving the usability of standard schemas. *Information Systems*, 36(2):209–221, April 2011.
- [138] L. Zhang and Issa R. R. A. Development of ifc-based construction industry ontology for information retrieval from ifc models. In *In Proceedings of the 2011 Eg-Ice Workshop, University of Twente, The Netherlands*, 6–8 July 2011.
- [139] Lina Zhou, Li Ding, and Tim Finin. How is the semantic web evolving? A dynamic social network perspective. *Computers in Human Behavior*, 27(4):1294–1302, 2011.
- [140] S. Zlatanova, J. Stoter, and U. Isikdag. Standards for exchange and storage of 3d information: Challenges and opportunities for emergency response. In *Proceedings of the 4th International Conference on Cartography & GIS*, volume 2, pages 17–28, Albena, June 2012.

Annexe I Introduction à la méthode de calcul de la Réglementation Thermique RT 2012

Cette annexe a pour but de présenter de façon synthétique les principales notions de la RT2012 [39] que nous avons utilisées dans ce travail de thèse. Elle reprend des extraits du document de la réglementation qu'on peut retrouver ici [57]. Nous allons dans un premier temps présenter la structure du bâtiment selon la RT2012 et de ses systèmes énergétiques. Ensuite, nous introduirons les différents modes de calculs possibles.

Structuration du Bâtiment selon la RT2012

Dans cette méthode de calcul un bâtiment est décrit selon quatre niveaux : Bâtiment, Zone, Groupe et Local. Les définitions suivantes sont reprises de l'annexe de la Méthode de calcul Th-BCE 2012 [57].

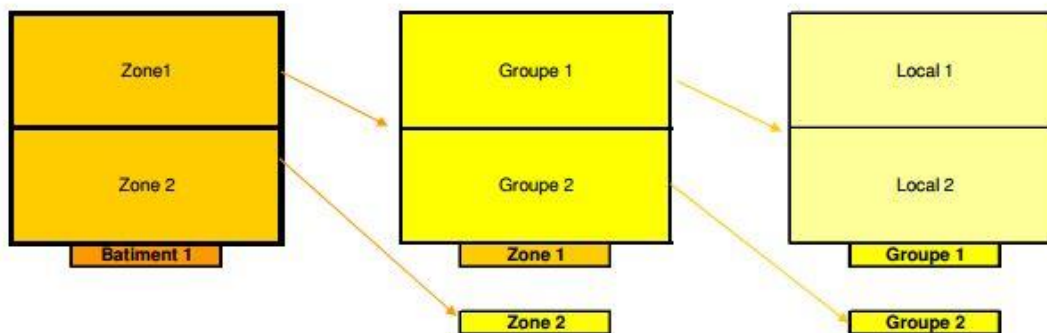


Figure 30 : Structuration du bâtiment selon la RT2012.

1. **Le niveau « Bâtiment »** : Les éléments communs à tout le bâtiment (par exemple la situation géographique ou l'altitude) sont définis à ce niveau. C'est le niveau où s'expriment les exigences réglementaires en matière de coefficient Bbio et Cep (présentés dans la section suivante).
2. **Le niveau « Zone »** : Ce niveau correspond à un regroupement des parties de bâtiment pour lesquels les scénarios d'utilisation sont identiques. A titre d'illustration, les scénarios des locaux de la zone nuit d'un hôtel, ou l'ensemble des logements d'un immeuble collectif auront les mêmes scénarios d'occupation.

3. **Le niveau « Groupe » :** Ce niveau regroupe la quasi-totalité des informations requises. C'est en particulier à ce niveau que s'effectue le calcul des températures intérieures ainsi que des besoins de chauffage, de refroidissement et d'éclairage.
4. **Le niveau « Local » :** Au sens de la présente méthode de calcul le niveau « Local » permet d'affiner les apports internes de chaleur et d'humidité, pris en compte ensuite au niveau du groupe. Les surfaces de locaux sont définies par usage, au niveau de la zone.

Structuration des systèmes dans la RT2012

Cette méthode de calcul distingue les catégories de systèmes suivantes : 1) Chauffage, 2) Refroidissement, 3) Ventilation, 4) ECS, 5) Eclairage, 6) Production d'énergie non liée aux systèmes précédents.

COMETH, le moteur de calcul utilisé dans ce travail de thèse a été développé comme support à la RT2012. Il simule le comportement thermique et énergétique d'un bâtiment et de ses systèmes énergétiques afin de calculer les consommations d'énergie et des indicateurs de confort. Un projet COMETH doit être conforme à la décomposition Bâtiment-Zone-Groupe introduite plus haut (figure 31 [52]).

Structure général d'un projet

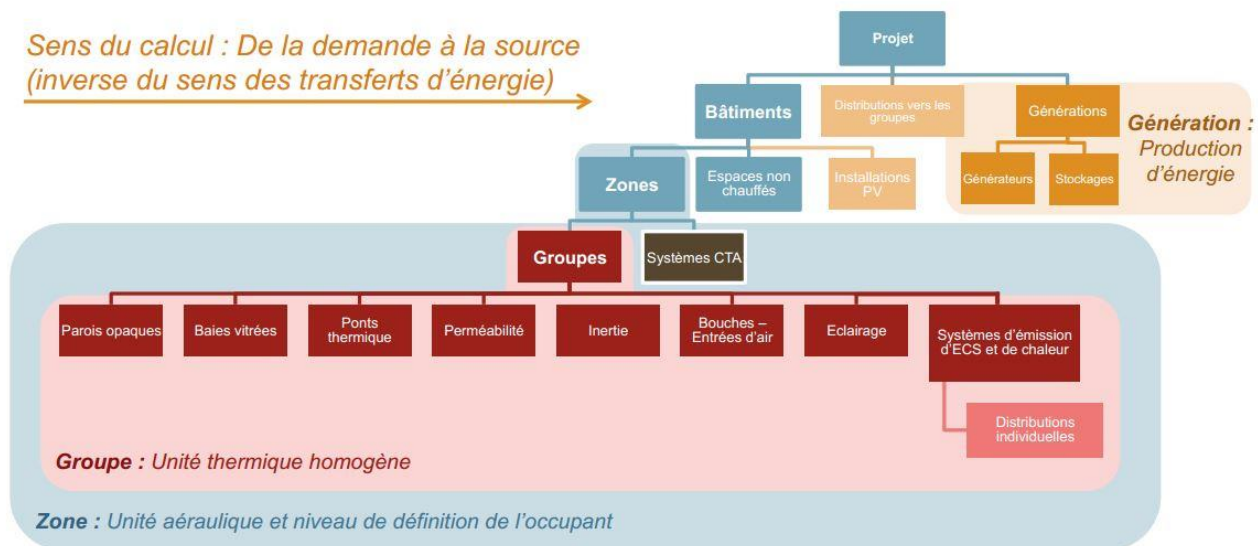


Figure 31 : Structure générale d'un projet avec COMETH.

Modes de calculs de la RT2012

Cette méthode de calcul utilise comme données d'entrée tous les éléments descriptifs du bâtiment et de ses équipements.

Il y a quatre modes de calculs :

- Th-B pour le calcul du Bbio
- ThC pour le calcul du Cep
- Th-EB pour le calcul du confort d'été en mode besoins
- Th-EC pour le calcul du confort d'été en mode consommations

Le coefficient Bbio (Besoin Bioclimatique) exprimé en points caractérise l'efficacité énergétique du bâtiment. Il permet d'apprécier celui-ci par rapport aux besoins de chauffage, de refroidissement et de consommations futures d'éclairage artificiel. Il s'appuie sur les éléments suivants :

- la conception architecturale du bâti (implantation, forme, aires et orientation des baies, accès à l'éclairage naturel des locaux, etc.),
- les caractéristiques de l'enveloppe en termes d'isolation, de transmission solaire, de transmission lumineuse, d'ouverture des baies et d'étanchéité à l'air,
- les caractéristiques d'inertie du bâtiment.

Le coefficient Cep exprimé en kWh/m² (SHONRT) d'énergie primaire représente les consommations d'énergie de chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire, d'auxiliaires et d'éclairage des bâtiments. Ce coefficient Cep ajoute au coefficient Bbio l'impact des systèmes énergétiques suivants :

- systèmes de chauffage et de refroidissement, y compris les auxiliaires,
- systèmes d'eau chaude sanitaire y compris les auxiliaires, auxiliaires de ventilation (l'impact des débits d'air étant pris en compte dans les consommations des systèmes de chauffage et de refroidissement),
- systèmes d'éclairage,
- systèmes de production locale d'énergie, y compris les auxiliaires.

Le coefficient Tic exprimé en °C est la température opérative (correspondant à la sensation de l'occupant) maximale horaire calculée en période d'occupation pour un jour chaud d'été conventionnel, associée à une séquence chaude représentative

Annexe II L'Information Delivery Manual développé pour notre application

Dans cette annexe, le processus IDM développé pour notre application est plus détaillé. On y retrouve un rappel de la process Map et le détail de chaque activité. Le tableau des *Exchange Requirements* est ensuite présenté avec une mise en correspondance avec l'*exchange requirement model* (ERM). L'ERM est une amélioration du tableau des ERs d'un point de vue logiciel avec la cartographie de l'information requise vers le champ de données exact (classe / élément et caractéristique / attribut) du format de données choisi.

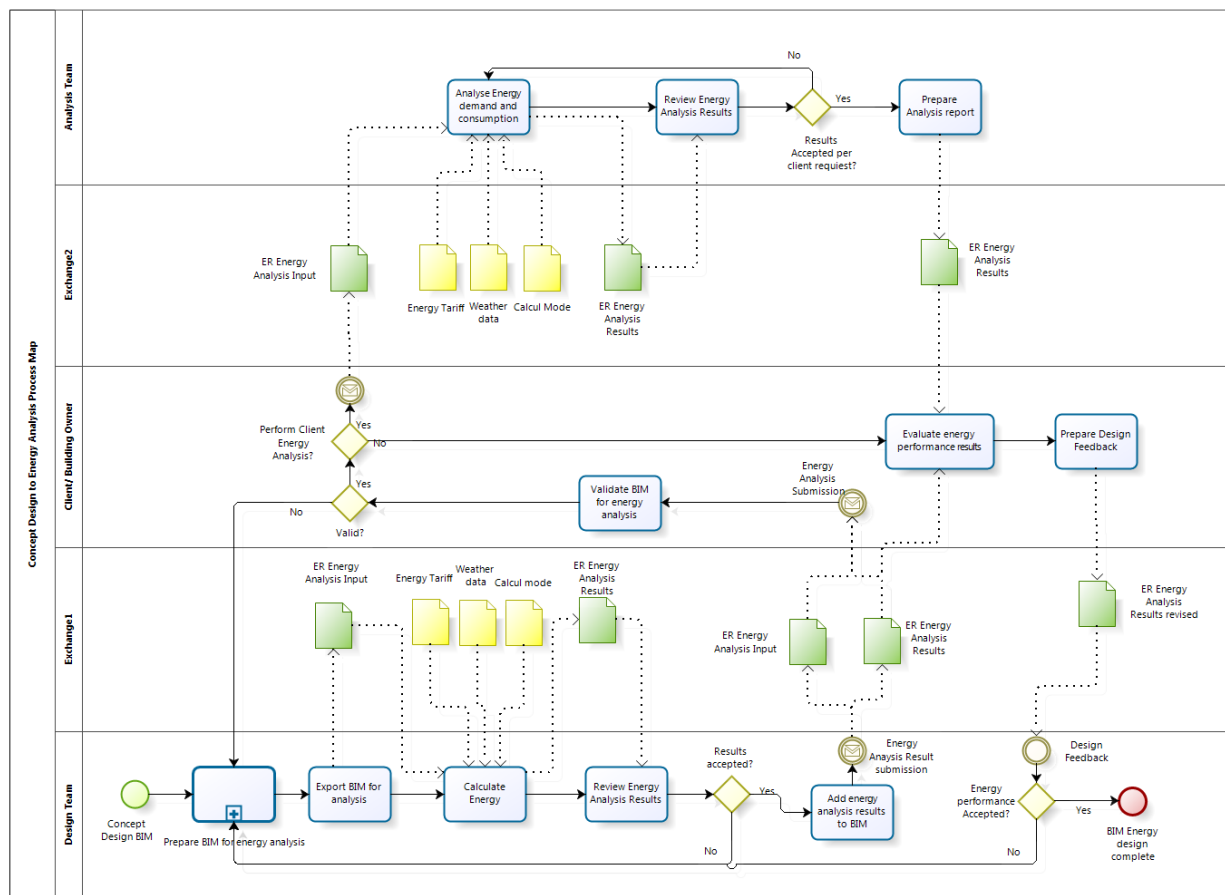


Figure 32 : Process Map "Concept Design BIM to Energy Analysis".

Concept Design BIM

Type	Concept Design BIM
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	<p>On suppose que l'architecte a défini un concept BIM initial.</p> <p>L'équipe de conception définit une conception complète du bâtiment. Le concept BIM devrait inclure:</p> <ul style="list-style-type: none"> o l'emplacement du site et la construction o l'orientation du bâtiment o le site, l'altitude o les informations sur l'histoire de la construction o géométrie 3D des bâtiments adjacents o géométries 3D du bâtiment, y compris les murs (extérieurs/ intérieurs), les toits, les planchers/ dalles, plafonds, fenêtres, portes

Prepare BIM for energy analysis

Type	Sous-processus
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Le concept BIM est passé au concepteur approprié pour préparer le BIM pour l'analyse énergétique.

Export BIM for energy analysis

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Une fois que le BIM a été préparé pour l'analyse de l'énergie, il est exporté vers l'IFC pour la simulation de l'énergie thermique. À ce stade, toutes les exigences d'échange nécessaires de la conception à l'analyse de l'énergie ont été respectées.

Calculate energy

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis

Documentation	L'équipe d'analyse est maintenant prête pour l'analyse énergétique. Après la sélection du mode de calcul approprié, des données météorologiques et le tarif de l'énergie, la simulation est exécutée. L'analyse de l'énergie permettra de déterminer la demande d'énergie thermique pour le bâtiment pour le chauffage et / ou le refroidissement. Elle sera déterminée en fonction de la configuration de l'espace du bâtiment, le type de construction, le système de CVC.
---------------	--

Review energy analysis results

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	<p>Les résultats de la simulation de l'énergie sont obtenus et évalués par l'équipe de conception. Les résultats peuvent être évalués directement à partir de la sortie de simulation énergétique, ou en utilisant un outil de validation du modèle BIM en utilisant le fichier IFC.</p> <p>Les résultats sont comparés aux objectifs énergétiques du départ. Si les objectifs ne sont pas atteints, le concepteur doit revenir à la tâche « préparer le BIM pour l'analyse de l'énergie » et faire des modifications à la géométrie du bâtiment et ses propriétés. Si les objectifs sont atteints, le concepteur peut aller à l'activité suivante.</p>

Add Energy Analysis results to BIM

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Une fois que l'équipe de conception est satisfaite de la conception, ils vont ajouter les résultats d'analyse de l'énergie du BIM et préparer un dossier pour l'examen de ces résultats par le client.

Validate BIM for Analysis

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Après réception de l'IFC BIM avec l'analyse des résultats de l'énergie, le client utilisera un outil de validation de données pour vérifier si le BIM répond à ses exigences.

Analyze energy demand and consumption

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Après la sélection du mode de calcul approprié, des données météorologiques et des tarifs de l'énergie, l'équipe d'analyse peut procéder à l'analyse de l'énergie thermique.

Review energy analysis results

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Les résultats sont examinés pour assurer de leur exactitude et leur intégrité.

Prepare energy analysis report

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Une fois les résultats d'analyse de l'énergie sont vérifiés et approuvés par l'équipe d'analyse, un rapport est préparée en comparant les résultats avec ceux du concepteur.

Evaluate energy performance results

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Le client évaluera le rapport d'analyse. La performance énergétique sera évaluée, ce qui entraîne une décision (« oui ou non ») de l'équipe de conception.

Prepare design feedback

Type	Activité
Nom	Concept Design to Energy Analysis
Documentation	Le client documentera l'analyse énergétique et présentera les résultats d'analyse de l'énergie révisés pour l'équipe de conception.

Tableau des Exchange Requirements

Type	Élément	dans COMETH	unit	type	opt	req	Correspondance en IFC
Structure du bâtiment							
Informations générales	Numéro du bâtiment	Index		String		X	IfcBuilding.Name
	Nom du bâtiment	Nom		String		X	IfcBuilding.LongName
	Altitude	Altitude	m	Double		X	IfcSite.RefElevatio
	Type d'usage pour la zone	Usage		String		X	IfcBuilding + IfcPropertySingleValue (Pset_BuildingCommon, OccupancyType)
Espace							
Informations générales	Numéro de l'espace	Index		string		X	IfcSpace.Name
	Nom de l'espace	Nom		String		X	IfcSpace.LongName
	Usage de l'espace	Usage		String		X	Pset_SpaceOccupancyRequirements, OccupancyType
	Couloir ou pas Indicateur sur l'aspect traversant de la zone	Is_traversant		bool	X		

Espace-Quantités	Surface du plancher hors d'œuvre nette	Shon_rt	m²	double		X	
	Définition des ratios de surfaces des locaux au sens des apports internes	Is_rat_1		Bool	X		IfcSpace+ IfcpropertySingleValue (Pset_SpaceCommon, GrossPlannedArea)
	ratio de surface utile du local sur la surface utile de la zone	Rat_1		double	X		
	Nombre de logements en maison individuelle ou en bâtiments collectifs d'habitation	Nb_logement		int		X	
	Différence de hauteur entre le point le plus bas de la zone et le sol	Hauteur	M	double		X	IfcBuildingStorey.Elevation
	Hauteur entre le point le plus bas de la zone et le point le plus haut de la zone	Hauteur_zone	M	Double		X	ifcspace.elevationwithflooring

	Surface utile pour le tertiaire au sens de la méthode de calcul Th-BCE 2012	suRT	m ²	double		X	IfcQuantityArea(BaseQuantities, NetFloorArea)
	Surface shab	Shab	m ²	Double		X	
	Volume de l'espace	V	m3	Double		X	IfcQuantityVolume(BaseQuantities, NetVolume)
	Définition de la hauteur de tirage thermique (surventilation naturelle)	Def_Httf		double	X		
	Différence de hauteur entre le point le plus bas de la baie la plus basse et le point le plus haut de la baie la plus haute	Httf	M	double	X		
	Type de répartition des ponts thermiques	Is_detail_calcul		Bool	X		

Besoins thermiques de l'espace	Longueur du pont thermique	Li	M	double	X		
	Transmission thermique	Psil	W/mK	double	X		
	Facteur solaire	Sf		double	X		
	Si c'est un hall	Is_hall		Bool	X		
	Si c'est climatisé	Categorie ce1 ce2		Bool		X	IfcBuilding + IfcPropertySingleValue (Pset_SpaceThermalRequirements,AirConditioning)
	Capacité thermique quotidienne du groupe ramenée à la surface utile du groupe	Cmg_surf	kJ/(K.m2)	double	X		
	Surface d'échange équivalente des parois opaques avec l'ambiance ramenée à la surface utile du groupe	amg_surf	kJ/(K.m2)	double	X		

	Capacité thermique séquentielle du groupe ramenée à la surface utile du groupe (Calcul de la TIC)	Cms_surf	kJ/(K.m ²)	double	X		
Besoins en éclairage	Eclairage requis du projet	Eiproj	Lux	double		X	IfcBuilding + Pset_SpaceLightingRequirements, Illuminance
	Mode de commande de l'éclairage	Gest_ecl			X		
	Part du local ayant accès à la lumière naturelle	Ratio_ecl_nat		double	X		IfcBuilding + Pset_SpaceLightingRequirements, ArtificialLighting (False)
Besoins en aération							
	Ventilation naturelle et hybride	Ventilation_Naturelle_Hybride		bool		X	

	Hauteur équivalent du conduit de ventilation naturelle	h_cond			X		ifcPropertySingleValue (Pset_SpaceThermalRequirements, NaturalVentilation)
	Type de ventilation	id_type_vent		Int			ifcPropertySingleValue (Pset_SpaceThermalRequirements, NaturalVentilation)
	Type de bouche d'extraction	Id_type_bouche		int			
	Périmètre du conduit de ventilation	Per_cond	M	double			(Pset_DistributionSystemTypeVentilation, MinimumHeight/MinimumWidth)
	Statut de la donnée d'indice de perméabilité à l'air du groupe	Valeur_Saisie_Def aut_Q4PaSurf				X	
	Indice de perméabilité à l'air du groupe	Q4PaSurf	m3/(h. m ²)	double		X	

Eléments opaques	Surface de la paroi	Ak	m ²	double		X	fcWall, IfcSlab, IfcRoof, IfcColumn, IfcBeam, IfcRamp, IfcStair IfcWall. HasCoverings
	S Azimut de la paroi	Alpha	°	double		X	
	Inclinaison de la paroi	Beta	°			X	
	Type de paroi, 1 : paroi verticale, 2 : paroi horizontale flux ascendant, 3 : paroi horizontale flux descendant	Type_Paroi_Inclk				X	IfcWallType
	Coefficient de transmission thermique de la paroi opaque pour l'inclinaison définie ci-dessus	Uk	W/m ² K	double		X	ifcPropertySingleValue (Pset_WallCommon, ThermalTransmittance)
	Facteur solaire de la paroi opaque non végétalisée pour le calcul Th-B et Th-C	Sf_ck/ Sf_ek				X	

	Paroi végétalisée ?	Is_Vegetalise		bool	X		
	Heure de simulation à partir de laquelle on considère une toiture végétalisée couverte de végétation (début de saison végétative)	T_Simul_Deb_V	h	int	X		
	Heure de simulation à partir de laquelle on considère une toiture végétalisée sans végétation (fin de saison végétative)	T_Simul_Fin_V	h	Int	X		
Eléments transparents							
	Azimut (0° : Sud ; 90° : Ouest ; 180° : Nord ; 270° : Est)	Alpha	°	Double		X	
	Inclinaison de 0° (horizontale vers le haut) à 90° (verticale)	Beta	°	Double		X	

	Surface de la baie vitrée	Ab				X	<i>IfcDoor, IfcWindow, IfcCurtainWall</i> <i>Qto_OpeningElementBaseQuantities</i>
	Type et gestion de la protection mobile	Choix_PM_GPM		string		X	
	Introduction d'une gestion de l'ouverture des baies	Baie_ouvrable		Int		X	
	Type d'ouvrant de la baie	Type_Ouvrant				X	
	Détecteur de présence (pour volets, stores enroulables ou autre)	Detec_Pres		bool	X		
	Degré de l'exposition au bruit	Exp_BR			X		
	Facteurs solaires pour Th-BC (matrice M_fixe_Sw_BC)	M_fixe_Sw_BC/M_fixe_Sw_E		String	X		
	Facteurs de transmission lumineuse pour Th-	M_fixe_Tl_BC / M_fixe_Tl_E		string		X	

	BC (matrice M_fixe_Tl_BC)						
	Gestion automatique de la fermeture	M_Rprot1_Auto		string	X		
	Mode de gestion de l'ouverture de la baie pour le calcul de la TIC	Mode_Gestion_E		string	X		
	Mode de gestion de l'ouverture de la baie en saison de refroidissement	Mode_Gestion_Et e		String	X		
	Mode de gestion de l'ouverture de la baie en saison de chauffage	Mode_Gestion_Hi ver		String	X		
	Mode de gestion de l'ouverture de la baie en mi-saison	Mode_Gestion_Mi Saison		String	X		
	Paramètre pour la gestion automatique de l'ouverture des	Param_OuvBaie_ E		string	X		

	baies pour le calcul de la TIC						
	Facteur de transmission lumineuse global de la baie vitrée avec PM en place	Tli_ap/ Tli_sp		double	X		
	Coefficient de transmission thermique	Uap/ Usp	W/m ² K	double			
	Seuil de vitesse de vent pour laquelle la protection (extérieure) est remontée pour la gestion automatique	Vvent_Lim_Auto			X		
	Saisie du ratio d'ouverture maximale	Valeur_Saisie_Def aut_Rouvmax	m/s	double	X		

