

Utilisation du BIM pour l'amélioration de la sécurité incendie dans la construction en bois massif en hauteur

par

Kristina KINCELOVA

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Sc.A.

MONTREAL, LE 13 SEPTEMBRE 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Kristina Kincelova, 2019



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Conrad Botton directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Pierre Blanchet, codirecteur de mémoire
Département des sciences du bois et de la forêt à l'Université Laval

M. Daniel Forgues, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Marc Oudjene, membre du jury
Département de génie civil et de génie des eaux à l'Université Laval

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 SEPTEMBRE 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur Conrad Botton pour son encadrement, les conseils et la confiance qu'il a témoignée au projet depuis le début. Je remercie également mon codirecteur Pierre Blanchet pour m'avoir offerte l'opportunité d'intégrer le CIRCERB et ainsi de partager mon travail avec différentes personnes du domaine.

Je tiens également à remercier Christian Dagenais de FPInnovations pour son expertise en sécurité incendie et sa pédagogie.

Je voudrais également remercier Claude Bourbeau et Catherine St-Marseille de Provencher Roy pour l'intérêt qu'ils ont prêté au projet et ainsi d'avoir permis de réaliser la preuve du concept.

J'aimerais remercier le CIRCERB et ses partenaires pour le soutien financier et également pour la création d'un environnement propice au partage humain et de connaissances, qui donne toujours plus de motivation de contribuer au secteur du bois.

Enfin, je tiens à remercier mes parents pour leur soutien, confiance dans mes décisions et encouragements tout au long de mes études malgré la distance.

Utilisation du BIM pour l'amélioration de la sécurité incendie dans la construction en bois massif en hauteur

Kristina KINCELOVA

RÉSUMÉ

Une intégration plus poussée de la sécurité incendie est nécessaire pendant le processus de conception afin d'accroître la fiabilité de la conception en termes de sécurité incendie. Cependant, malgré la nature et la complexité des codes du bâtiment, y compris la réglementation en matière d'incendie, ils sont principalement vérifiés manuellement, ce qui peut engendrer des interprétations subjectives ou des erreurs potentielles. Les technologies de modélisation des données du bâtiment (BIM) offrent aujourd'hui de nouveaux outils pour automatiser différentes tâches du processus de conception et de construction. La recherche présentée dans ce mémoire vise à étudier comment intégrer efficacement la sécurité incendie dans le processus de conception à l'aide des outils BIM à travers l'approche de la vérification automatisée de la conformité.

Le travail cherche à proposer une méthode cohérente qui aborde les enjeux de la sécurité incendie dans la globalité à travers la science de la conception. Les différentes approches et les outils disponibles ont donc été comparés dans le contexte du respect du code de protection incendie. Suite à la compréhension contextualisée des besoins, il était possible de construire la méthode complète permettant de créer des règles de vérification de manière itérative. Les enjeux à aborder ont été identifiés à travers la construction des règles et la validité de l'approche présentée est vérifiée par application à un modèle BIM de projet réel.

La méthode proposée pour la création des règles de vérification est formalisée à travers cinq étapes dans le but de couvrir l'ensemble du processus en se concentrant sur les aspects de sécurité incendie dans le bâtiment avec un outil de programmation visuelle. La phase de validation sur le projet réel a montré que des règles réutilisables peuvent être créées, sous condition de construire le modèle BIM conformément aux exigences. Dans ce contexte, un Model Attribute Table a été créé pour définir les besoins d'information spécifiques pour la protection passive. Les règles implémentées dans le cadre de ce travail couvrent des exigences géométriques et non géométriques, la méthode présente cependant des limites quant à des études géométriques complexes ou des approches de protection active nécessitant des données de dimensionnement avancées.

Mots-clé : code du bâtiment, modélisation des données du bâtiment, vérification automatisée, protection incendie, programmation visuelle.

Use of BIM to improve fire protection integration in high-rise timber buildings

Kristina KINCELOVA

ABSTRACT

Further integration of fire safety is required during the design process to increase the reliability of the fire safety design. However, despite the nature and the complexity of building codes, including fire regulations, they are mostly manually verified, which may lead to subjective interpretations or potential errors. Building Information Modeling (BIM) technologies nowadays offer new approach for automating different tasks in the building process. The research presented in this thesis aims to investigate how to effectively integrate fire safety into the design process using BIM tools through the automated compliance checking.

The work suggests a coherent method that addresses the issues of fire safety globally through the design science. Different approaches and available tools have therefore been compared in the context of compliance with the fire protection code. As a result of the contextualized understanding of the needs, it was possible to build the complete method for iteratively creating verification rules. The issues to be addressed have been identified through the construction of the rules and the validity of the presented approach is verified by application to a real project building model.

A code checking method was proposed for creation of rules for code checking. It was formalized through five steps that cover the entire process by focusing on fire safety aspects in the building with a visual programming tool. The validation phase on the real project has shown that reusable rules can be created if the building model is built according to the requirements. In this context, a Model Attribute Table has been created to define specific information needs for passive protection. The rules implemented in this work cover several geometric and non-geometric requirements. However, there are limitations to complex geometric cases or active protection requiring advanced dimensioning.

Keywords: building information modeling, building codes, code checking, fire protection, visual programming.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 La construction en bois	3
1.1.1 Construction en bois massif.....	3
1.1.2 Tenue au feu du bois.....	4
1.2 Principes de la sécurité incendie dans la construction	8
1.2.1 Propagation du feu	9
1.2.2 Résistance au feu.....	13
1.3 Intégration de la sécurité incendie au cours de la conception d'un bâtiment.....	14
1.3.1 La modélisation des données du bâtiment	16
1.3.2 Classification des objets.....	17
1.4 Vérification automatisée basée sur le BIM de la conformité par rapport aux codes ...	21
1.4.1 Analyse des règles.....	23
1.4.2 Construction des règles.....	27
1.4.3 Exigences d'informations dans le modèle BIM.....	30
1.4.4 Exécution et rapport de vérification des règles.....	35
1.5 Résumé.....	36
CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT.....	39
2.1 Objectifs spécifiques	39
2.2 Méthodologie et approche de recherche	40
2.3 Choix de logiciel de construction.....	42
2.4 Application du CNBC.....	43
2.5 Présentation des articles	46
CHAPITRE 3 FIRE SAFETY IN TALL TIMBER BUILDINGS: A BIM-BASED AUTOMATED CODE-CHECKING APPROACH.....	47
3.1 Introduction.....	48
3.1.1 Main fire safety challenges	49
3.1.2 BIM and automated code compliance checking	51
3.1.3 Recent innovations in research	52
3.1.4 Summary	57
3.2 Materials and Methods.....	58
3.2.1 The iterative process of construction of the method.....	60
3.2.2 Evaluation criteria definition for the proof of concept	61
3.3 Results: Method formalization.....	61
3.3.1 General overview	62
3.3.2 Rule analysis	63
3.3.3 Rule construction	64

3.3.4	Mapping of information requirements and building model preparation...	71
3.3.5	Realization of rule checking with evaluation.....	77
3.4	Results: Proof of concept	78
3.4.1	Fire-resistance rating.....	78
3.4.2	Flame spread rating.....	80
3.4.3	Fire separations	82
3.4.4	Continuity of fire separations.....	84
3.4.5	Evaluation	86
3.5	Discussion and conclusion	87
CHAPITRE 4 DISCUSSION DES RÉSULTATS.....		89
4.1	Model Attribute Table.....	89
4.2	Synthèse des règles implémentées	93
4.3	Gestion des espaces.....	96
4.4	Vers un standard de conception des maquettes ?	97
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		99
ANNEXE I	TYPES DE PROPAGATION DU FEU DANS UN BÂTIMENT.....	101
ANNEXE II	BIM-BASED CODE COMPLIANCE CHECKING FOR FIRE SAFETY IN TIMBER BUILDINGS: A COMPARISON OF EXISTING TOOLS	105
ANNEXE III	MODEL ATTRIBUTE TABLE.....	124
ANNEXE IV	NŒUD DE CLASSIFICATION D'ÉLÉMENTS PAR COMPARTI- MENT SUR UN ÉTAGE	139
ANNEXE V	NŒUD DE CLASSIFICATION DES MURS SÉPARATION COUPE- FEU PAR COMPARTIMENT COMPOSÉ DE PLUSIEURS CHAMBRES	141
ANNEXE VI	NŒUD DE CLASSIFICATION DES ESPACES VERTICAUX PAR COMPARTIMENT	143
ANNEXE VII	ORGANISATION DU SCRIPT DE DYNAMO POUR LA VÉRIFICATION DE DEGRÉ DE RÉSISTANCE AU FEU.....	145
ANNEXE VIII	ORGANISATION DU SCRIPT DE DYNAMO POUR LA VÉRIFICATION D'INDICE DE PROPAGATION DU FEU.....	147
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		149

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Effet de la température sur la densité du bois	5
Tableau 1.2	Action en fonction du développement du feu	10
Tableau 1.3	Classification des indices de propagation de la flamme selon les exigences au feu selon ASTM E84 et CAN/ULC S102	11
Tableau 1.4	Critères d'évaluation exigés pour chaque élément résistant au feu	14
Tableau 1.5	Synthèse des interfaces entre disciplines à considérer en protection incendie passive et active	15
Tableau 1.6	Exemple de classification Uniclass II pour les murs	19
Tableau 1.7	Exemple de classification Masterformat 2016 pour le béton	20
Tableau 1.8	Exemple de classification Masterformat 2016 pour la construction en bois massif	20
Tableau 1.9	Correspondances sémantiques de deux catégorisations différentes	24
Tableau 2.1	Clauses sélectionnées de CNBC	44
Tableau 2.2	Clauses sélectionnées du Guide RBQ	45
Tableau 3.1	Proposed table for extraction of semantics	64
Tableau 3.2	Lists of spaces as mentioned in the NBCC classified by the three different uses	73
Tableau 3.3	Proposed table for synthesis of extracted objects from rule analysis	74
Tableau 3.4	Model Attribute table template for preparing building model for a code check	75
Tableau 3.5	Object oriented representation of clause 3.1.13.2. from NBCC	81
Tableau 3.6	Results of the evaluation by four defined criteria of the example scripts ..	86
Tableau 4.1	Proportion des différents types de paramètres	92
Tableau 4.2	Résultats des clauses sélectionnées de CNBC	93
Tableau 4.3	Résultats des clauses sélectionnées du Guide RBQ	95

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Chaleur spécifique en fonction de la température.....	5
Figure 1.2	Illustration de la carbonisation d'une planche en bois.....	6
Figure 1.3	Évolution de la contrainte appliquée et de la résistance d'une section en fonction du temps lors de l'exposition au feu.....	7
Figure 1.4	Organigramme des concepts de sécurité incendie NFPA.....	8
Figure 1.5	Représentation des (a) surfaces de façade de rayonnement (b) Distance limitative.....	12
Figure 1.6	Trois critères d'évaluation d'un élément résistant au feu.....	13
Figure 1.7	Hierarchie d'un objet IfcProduct.....	18
Figure 1.8	Exemple d'hierarchie d'une catégorie mur comme présenté dans Revit...	19
Figure 1.9	Survol général de l'histoire des solutions existantes de vérification automatisée.....	22
Figure 1.10	Exemple de balisage d'une clause réglementaire.....	27
Figure 1.11	Exemple d'objet IFC étendu.....	32
Figure 1.12	Proposition de recensement des données.....	33
Figure 1.13	Aperçu du sujet couvert par la littérature recensée.....	38
Figure 2.1	Méthodologie de recherche.....	41
Figure 3.1	Research approach.....	59
Figure 3.2	General overview of the suggested method.....	63
Figure 3.3	Visual programming script structure for any compliance check.....	66
Figure 3.4	Input example of lists for flame spread rating checking.....	66
Figure 3.5	Geometry representation of continuity of a vertical fire separation.....	67
Figure 3.6	Multiple rooms compartment representation.....	69

Figure 3.7	Vertical service spaces representation	70
Figure 3.8	(a) Visual programming script structure for any compliance check; (b) Excel visual of the exported non-compliant lists, example of continuity ..	78
Figure 3.9	Compartment node with visualized inputs.....	83
Figure 3.10	Corresponding levels of sublists for geometric study for the floor level n85	
Figure 3.11	The highlighted geometries are checked if they overlap to respect fire separation continuity.....	85

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM	American Society for Testing and Materials
BIM	Building Information Modeling
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLT	Cross-Laminated Timber
CNBC	Code National du Bâtiment du Canada
CSA	Association canadienne de normalisation
DRF	Degré de résistance au feu
FDS	Fire Dynamics Simulator
IDM	Information Delivery Manual
IPF	Indice de propagation de la flamme
MEB	Model Element Breakdown
MAT	Model Attribute Table
MDB	Modélisation des données du bâtiment
MVD	Model View Definition
RASE	Requirement, Applicability, Selection, Exception
SMC	Solibri Model Checker
SWRL	Semantic Web Rule Language
VCCL	Visual Code Checking language
VPL	Visual Programming Language
XML	eXtensible Markup Language

INTRODUCTION

Le bois est un matériau de construction avec de nombreux avantages environnementaux. Le bâtiment durable doit garantir une efficacité énergétique et la protection de la santé de l'occupant, mais également assurer une utilisation consciente des matériaux de construction. Une faible quantité d'énergie grise est consommée lors de la transformation du bois et celui-ci possède une faible empreinte carbone. Ainsi, le bois en tant que matériau de construction a généralement des indices d'évaluation environnementaux plus bas que l'acier, notamment ceux du potentiel de réchauffement climatique, des émissions atmosphériques et des rejets d'eau (Forest Products Laboratory, 1999).

Malgré ces caractéristiques intéressantes, le secteur reste sceptique face à un emploi plus répandu de ce matériau dans la construction, notamment dû à la complexité du code (Gosselin, Blanchet, Lehoux, & Cimon, 2016). En effet, étant donné que le matériau est combustible, de nombreuses restrictions en termes de sécurité incendie s'y appliquent. Ainsi, elles imposent d'étudier les solutions pour pallier ces restrictions, notamment en favorisant la prise en compte des enjeux liés à la sécurité incendie plus en amont dans la phase conception afin de mieux contrôler la conformité du projet aux réglementations prescrites. Eastman propose en 2009 de vérifier la conformité du projet de conception par rapport aux exigences normatives en automatisant des règles basées sur un modèle des données du bâtiment (BIM) (Eastman, 2009). En effet, étant donné l'intégration toujours plus croissante du BIM dans les pratiques de conception, il s'avère intéressant d'exploiter les données contenues dans les modèles pour vérifier la conformité de la conception par rapport aux exigences normatives. Cette approche comprend plusieurs étapes pour arriver au rapport de résultats à partir du texte réglementaire. Ainsi, des travaux de recherche existent (Eastman, 2009; Kim, Lee, Shin, & Choi, 2017; Y.-C. Lee, Eastman, & Solihin, 2016; Preidel & Borrmann, 2016; Taciuc, Karlshøj, & Dederichs, 2016) pour aborder une ou plusieurs parties de cette méthode. Or les réglementations liées au feu sont complexes et pour leur automatisation, il est nécessaire de prendre en compte les spécificités du domaine, entre autres les relations spatiales entre les éléments. La revue des approches existantes, présentées dans la suite, a

montré qu'il manque des méthodes complètes qui s'intéressent à la sécurité incendie et donc qui pourraient contribuer à la caractérisation des besoins en termes de modélisation, afin de créer un rapprochement entre le modèle et les technologies de vérification.

Ce travail de recherche s'intéresse au lien plus étroit à établir entre les pratiques, d'une part touchant à la vérification automatisée et la réglementation en matière de sécurité incendie, et de l'autre prenant en compte la réalité des pratiques de modélisation BIM. L'objectif est de proposer une méthode globale basée sur le BIM pour la vérification automatisée des normes de sécurité incendie dans la construction en bois, en utilisant une méthodologie basée sur la science de la conception (Hevner, March, Park, & Ram, 2004). Les objectifs spécifiques sont d'abord d'identifier l'outil le plus adapté dans le contexte des prescriptions canadiennes concernant la sécurité incendie et ensuite de proposer la méthode et de l'évaluer dans la pratique. Enfin, il s'agira d'émettre les recommandations concernant la préparation du modèle BIM pour une meilleure intégration de la sécurité incendie.

Dans le premier chapitre, la construction en bois sera abordée d'abord en montrant le comportement au feu de ce type de construction. Ensuite, les concepts fondamentaux de la sécurité incendie qui sont utilisés dans les codes du bâtiment sont définis, afin de comprendre le sens des prescriptions étudiées. Le BIM sera alors défini et le rôle de cette approche technologique au cours de la conception d'un projet sera démontré. Une fois les bases de la sécurité incendie en construction bois et du BIM acquises, il sera possible d'établir une revue critique sur les approches existantes pour la vérification automatisée basée sur le BIM de la conformité au code du bâtiment. Le deuxième chapitre présente la méthodologie et contextualise l'article scientifique issu de cette recherche. Ce dernier figure donc dans chapitre 3 et détaille la méthode complète proposée ainsi que la preuve du concept. Le chapitre 4 complète la discussion des résultats de l'article, pour ensuite terminer le rapport avec une conclusion sur la portée du travail.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 La construction en bois

Deux grands types de systèmes de construction en bois peuvent être distingués du point de vue de la protection incendie dans le contexte du Code National du Bâtiment du Canada (CNBC) : l'ossature légère et la construction en gros bois d'œuvre. L'ossature légère est limitée à 6 étages, alors que la construction en gros bois d'œuvre est autorisée à atteindre 12 étages dans le cadre des solutions acceptables. L'étude dans la suite sera restreinte au gros bois d'œuvre.

1.1.1 Construction en bois massif

La construction en gros bois d'œuvre comprend le bois massif, le bois lamellé-collé et le bois lamellé-croisé. Les éléments du lamellé-collé sont fabriqués à partir de plusieurs planches, d'épaisseur allant de 35 à 45mm (Buchanan & Abu, 2001), qui sont collées ensemble par des adhésifs structuraux (résorcinol, polyuréthane, mélamine, etc). Ils sont généralement fabriqués de composants aboutés. Ceci est notamment avantageux pour les pratiques actuelles, où des arbres beaucoup plus jeunes et donc plus petits sont exploités (Forest Products Laboratory, 1999) en plus de permettre une sélection des pièces à abouter afin d'optimiser la performance finale des produits. Le lamellé-collé présente également un intérêt architectural grâce à la liberté d'emprunter différentes formes, les éléments en bois individuels peuvent être soit droits ou courbés. Différents degrés de courbure peuvent être atteints en fonction de l'épaisseur des lamelles. Ceci contribue à son emploi dans les constructions en hauteur.

Les panneaux structuraux de bois lamellé-croisé ou *cross-laminated timber* (CLT) sont des panneaux de grandes dimensions constitués de planches en bois massif, empilées en couches croisées à 90° et collées entre elles sur toute leur surface. Les panneaux comportent

habituellement 3,5 ou 7 plis. Les planches sont assemblées par aboutage à entures multiples et collées par un adhésif structural (généralement en polyuréthane) (FPInnovations, 2014). Le panneau CLT peut être utilisé comme mur porteur, plancher ou support de toiture, mais également sous forme de poutres et de colonnes.

Les éléments lamellés-collés sont donc bien adaptés au système poteau-poutre (Gerard, Barber, & Wolski, 2013), tel qu'employé dans les projets Treet (14 étages) ou Mjøstårnet (18 étages) de Moelven en Norvège. Au Québec, les immeubles Origine (12 étages) et Arbora (8 étages) ont été construits à leur tour avec le système des panneaux CLT. Comparé à l'ossature légère, le système en bois massif s'apprête mieux à la construction en hauteur grâce à sa capacité à reprendre et acheminer les charges gravitaires, mais également latérales.

1.1.2 Tenue au feu du bois

Le bois est un matériau combustible et donc un bâtiment en bois sera considéré comme une construction combustible du point de vue du CNBC. Ainsi, nous allons d'abord étudier les effets d'exposition aux températures élevées sur les éléments en bois.

1.1.2.1 Propriétés thermiques

Le comportement du matériau varie avec la température à laquelle il est exposé, notamment quand l'humidité est évacuée au-dessus de 100°C et quand le bois carbonise à 300°C, il y a une perte de masse dans la section carbonisée (Figure 1.1). La densité du bois diminue également à partir du moment où l'évaporation de l'eau présente dans le bois commence (Tableau 1.1) (Buchanan et Abu 2001). La combustion du bois s'accompagne également de la production de fumée, où il s'agit d'un mélange de produits de la pyrolyse et de l'air situé à proximité du feu. Ainsi, le feu contient des gaz, des particules solides et des gouttes de liquide (Buchanan & Abu, 2001). Les gaz toxiques sont également relâchés à ce moment-là à cause de la décomposition thermique du bois et des substances cellulosiques.

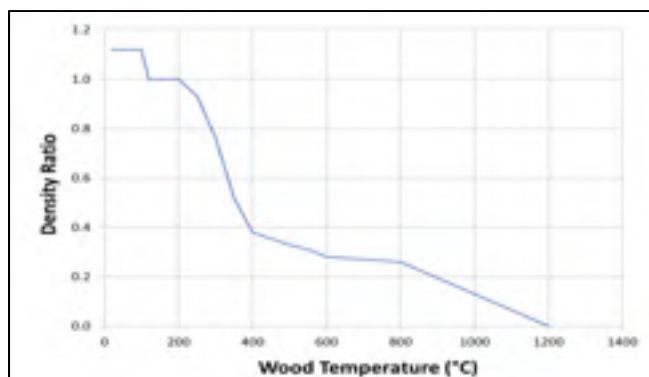


Figure 1.1 Ratio de masse volumique en fonction de la température
Tirée de BS EN 1995-1-2:2004 (1995)

Tableau 1.1 Effet de la température sur la densité du bois

Température du bois	Densité du bois
$T > 100^{\circ}\text{C}$ (Évaporation eau)	90% densité originale
$T > 300^{\circ}\text{C}$ (Carbonisation)	20% densité originale

Quand le bois est exposé au feu, la température de la surface proche du feu s'approche de la température de la flamme. Au-dessus de 300°C le matériau sera en mesure de libérer suffisamment de gaz et de chaleur pour générer une température suffisamment élevée pour le maintien du feu (Bowyer, Shmulsky, & Haygreen, 2007) et une couche carbonisée se forme alors. La propagation de la chaleur à l'intérieur d'un élément en bois se fait en plusieurs couches (Figure 1.2). La partie qui est à plus de 200°C est la zone de pyrolyse : le bois dans ce domaine est en train de se décomposer thermiquement en produits gazeux. Et le processus est d'autant plus accéléré quand la température est supérieure à 260°C . Cette zone peut être reconnue grâce à la perte de masse et de décoloration du bois (Buchanan & Abu, 2001). Une fois que la couche de carbonisation est formée, la chaleur continue à se propager, mais à un rythme plus faible (Bowyer et al., 2007), formant ainsi une couche d'isolation thermique. C'est pour cela que le cœur du bois peut maintenir sa température initiale pendant un laps de temps considérable malgré une combustion occurrente à la surface.

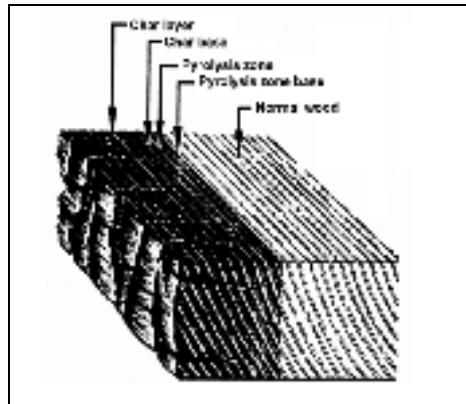


Figure 1.2 Illustration de la carbonisation d'une planche en bois
Tirée de Forest Products Laboratory (1999)

1.1.2.2 Carbonisation

Les codes des différents pays utilisent des approches différentes dans l'évaluation de la capacité des éléments structuraux. Généralement, il est considéré que seule la section résiduelle de dimensions d_f et b_f participe uniformément à la résistance et que le module de résistance est modifié par un coefficient de correction de résistance au feu K_f . Ainsi, la section résiduelle sera déterminée à partir du taux de carbonisation. Celui-ci dépend des facteurs suivants:

- temps d'exposition,
- nombre des faces exposées,
- rigidité et résistance du bois,
- température de l'environnement,
- humidité du bois.

Cependant des modèles plus simples, qui prennent en compte notamment le temps d'exposition au feu, sont utilisés et admis par les codes du bâtiment, autant en Amérique du Nord qu'en Europe. Uniquement la couche carbonisée est enlevée du calcul de la section résiduelle, cela correspond à une épaisseur de $c = \beta t$ où t est le temps d'exposition au feu et β est le taux de carbonisation. Le taux de carbonisation est déterminé à partir des tests de

résistance au feu. La norme CSA O86-14 indique le calcul de l'épaisseur de la couche carbonisée, tel que présenté dans la formule (1.1) en utilisant le taux de carbonisation normalisé β_n

$$a_{char,eff} = \beta_n \cdot t + d_o \quad (1.1)$$

$$\text{avec } \beta_n = 0.7 \text{ mm/min}$$

$$\text{et } d_o = \begin{cases} \frac{t}{20} \cdot 7 \text{ mm} & \text{si } t < 20 \text{ min} \\ 7 \text{ mm} & \text{sinon} \end{cases}$$

Ainsi, étant donné la faible conductivité du matériau ($0.14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), la température à l'intérieur d'une section va augmenter lentement. Les températures à l'intérieur des éléments en bois peuvent être déterminées en utilisant les modèles analytiques de transfert de chaleur ou par les méthodes numériques des éléments finis si une étude plus détaillée est nécessaire. Les modèles sont basés sur les propriétés thermiques du bois. Malgré la perte de densité et donc de résistance dans la partie carbonisée, le bois ne subit qu'une légère perte de résistance dans la section résiduelle. La contrainte de la section augmente donc vu qu'uniquement la section réduite $d_f \cdot b_f$ va reprendre les efforts (Figure 1.3).

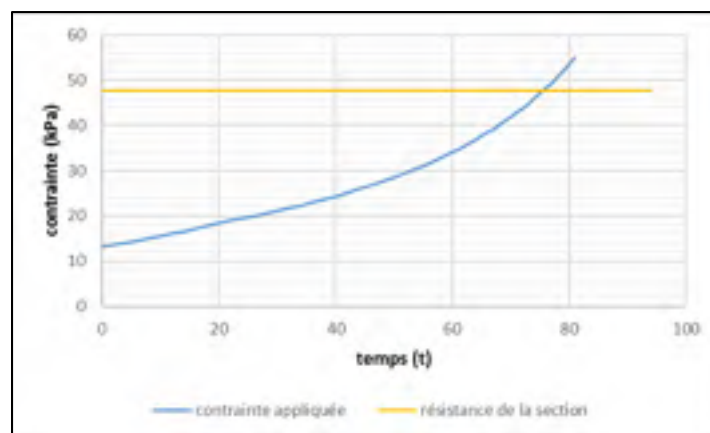


Figure 1.3 Évolution de la contrainte appliquée et de la résistance d'une section en fonction du temps lors de l'exposition au feu

Nous avons donc vu les bases concernant le comportement du bois aux températures élevées, dont vont découler certaines contraintes qui seront retrouvées dans le CNBC pour la construction en bois. C'est pour cela que les principes de la sécurité incendie à l'échelle d'un bâtiment seront abordés dans la suite.

1.2 Principes de la sécurité incendie dans la construction

L'analyse intégrée de la sécurité incendie est une approche méthodique représentée par l'organigramme des concepts de la sécurité incendie (Figure 1.4) de la National Fire Protection Association (NFPA). Les prescriptions du CNBC sont dérivées à partir de cette méthode qualitative et l'organigramme nous indique quels sont les concepts qui doivent être examinés afin d'assurer la sécurité incendie (Canadian Wood Council, 1996). Les objectifs vont du plus général au plus particulier et le CNBC se concentre notamment sur la branche de la gestion de l'impact du feu, comme indiqué par le Canadian Wood Council (1996).

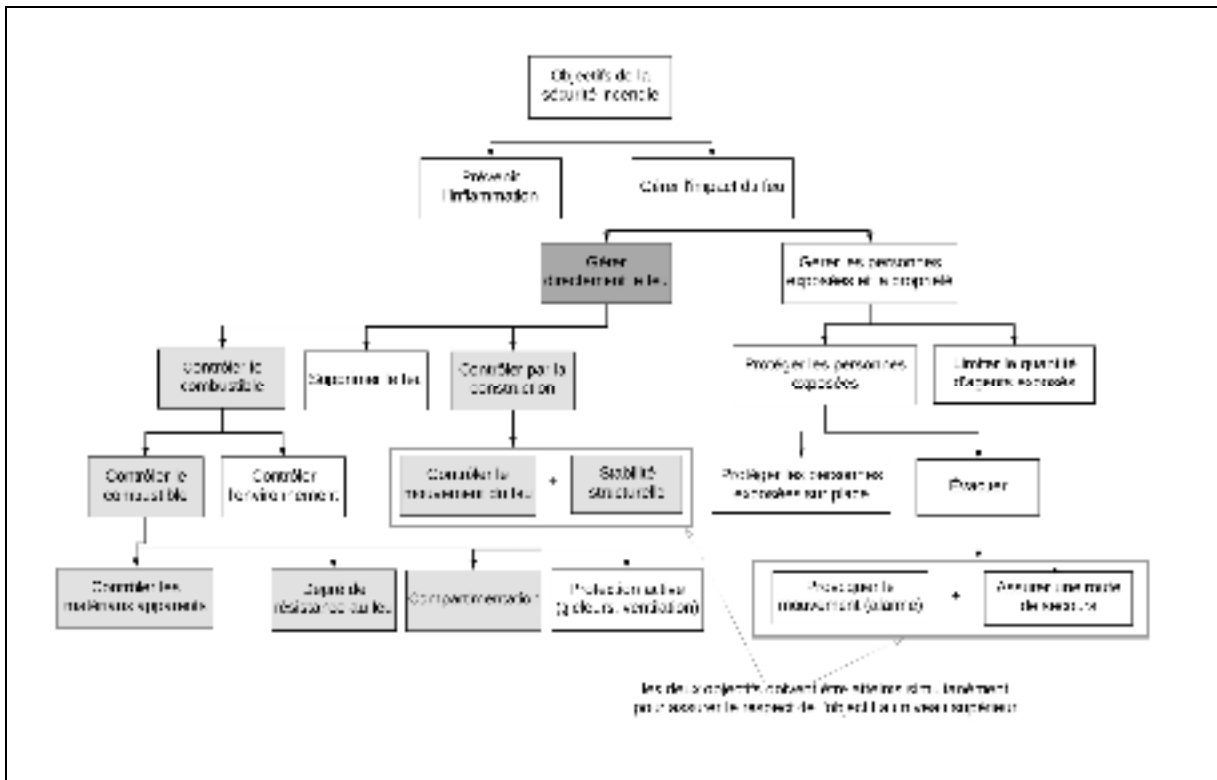


Figure 1.4 Organigramme des concepts de sécurité incendie NFPA
Adaptée de NFPA (2012)

Dans le contexte de la construction combustible, il semble avant tout important de contrôler le mouvement du feu et d'assurer la stabilité structurelle de ces éléments, c'est-à-dire le contrôle passif. Afin de contrôler le mouvement du feu, les moyens de propagation seront d'abord présentés (surligné dans la Figure 1.4).

1.2.1 Propagation du feu

Quatre types de propagation du feu sont distingués dans un bâtiment selon Buchanan & Abu (2001): À l'intérieur de la pièce d'origine, entre deux pièces à au même étage, entre deux pièces et deux étages et entre deux bâtiments. Dans l'ANNEXE I, Tableau-A I-1 sont synthétisées les causes ainsi que les moyens de propagation associés par rapport à chaque type de propagation. Il s'agit essentiellement d'identifier les causes, telles que le choix de matériaux, de degré de résistance au feu et la continuité des séparations coupe-feu. Ainsi, il est possible de proposer des solutions de prévention générales (Tableau 2.1) telles que décrites par Buchanan & Abu (2001). Le Tableau-A I-1 montre que la propagation du feu à différents niveaux n'a pas le même impact, par conséquent, des actions différentes correspondent à chaque phase du développement du feu (Tableau 2.1). En effet, le contrôle passif est non seulement important au début dans la phase de croissance, mais s'avère également essentiel en phase de plein développement, afin de contenir le feu à l'endroit d'origine et permettre l'évacuation dans le reste du bâtiment.

Tableau 1.2 Action en fonction du développement du feu
Adapté de Buchanan & Abu (2001)

Phase de développement du feu	Inflammation	Phase de croissance	Phase de plein développement	Phase d'extinction
Comportement du feu	Réchauffement du combustible	Combustion contrôlée par le combustible	Combustion contrôlée par ventilation	Combustion contrôlée par le combustible
Comportement humain	Prévenir l'inflammation	Éteindre à la main, évacuer	Mort	
Détection	Détecteurs de fumée	Détecteurs de fumée et de la chaleur	Fumée et flamme externe	
Contrôle actif	Prévenir l'inflammation	Extinction par les gicleurs ou pompiers Contrôle de la fumée	Contrôle par pompiers	
Contrôle passif		Sélection des matériaux avec faible inflammabilité	Fournir une résistance au feu Contenir le feu et empêcher sa propagation dans d'autres parties du bâtiment Prévenir la défaillance	

1.2.1.1 Indice de propagation de la flamme

Afin de contrôler la combustion en phase de croissance, il est important de prendre en compte l'indice de propagation de la flamme (IPF). Le test normalisé CAN/ULC S102 est utilisé pour l'évaluation du risque initial, l'indice représentant le taux de propagation du feu

est un nombre adimensionnel qui compare les matériaux utilisés par rapport aux matériaux références, le panneau de ciment (IPF=0) et le chêne rouge (IPF=100). Les indices de propagation de la flamme sont répartis dans les catégories différentes (Tableau 1.3) (Buchanan & Abu, 2001; CNRC, 2010).

Tableau 1.3 Classification des indices de propagation de la flamme selon les exigences au feu selon ASTM E84 et CAN/ULC S102

Classe	IPF	Exemples des matériaux	Exemple d'utilisation
A	0-25	Maçonnerie Gypse Certains bois durs avec traitement à retardateurs de flammes	Escalier et corridors des issues de secours
B	26-75	Certains bois durs non traités	Escalier et corridors des issues de secours
C	76-200	Bois à usage domestique Panneaux de fibres OSB Contreplaqué	Finitions intérieures des endroits qui ne sont pas considérés comme issues de secours
Non classifié	>200	Tapis de laine ou de nylon	

1.2.1.2 Séparation spatiale entre deux bâtiments

La propagation du feu entre deux bâtiments est un aspect très sécurisé dans le CNBC par le biais d'imposition d'aire maximum des baies non-protégées. En effet, il s'agit de la distance minimale pour assurer que le rayonnement émis dans un incendie potentiel par les baies non-protégées soit suffisamment atténué pour ne pas provoquer une inflammation dans le deuxième bâtiment. Sachant que le flux thermique critique est fixé à 12.5 kW/m^2 (CNRC, 2010), le rayonnement reçu peut être déterminé par $\dot{q} = \Phi \left(\frac{A_{baie}}{A_{façade}} \right) E_{baie} \leq 12.5 \text{ kW/m}^2$.

Afin de respecter cette contrainte, le concepteur va jouer sur la surface des baies non protégées A_{baie} , étant donné que la distance limitative est imposée par l'environnement.

Le pouvoir émissif d'une baie est fixé à $E_{baie}=180 \text{ kW/m}^2$ pour les usages principaux des groupes A,B,C,D et F-3 qui sont considérés comme risque normal (Torvi, Kashef, Benichou & Hadjisophocleous, 2005), sachant que uniquement les groupes C et D sont autorisés pour la construction en bois de 12 étages (Veilleux, Gagnon, & Dagenais, 2015). Ensuite, une $A_{façade}$ est délimitée par des séparations coupe-feu ayant un degré de résistance au feu (Figure 1.5). Enfin, le facteur de forme Φ (formule 1.2) utilise la distance d entre les deux façades telle que $d=2z$ (Figure 1.5).

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \left(\frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \cdot \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right] \quad (1.2)$$

avec $X = \frac{A}{2d}$ et $Y = \frac{B}{2d}$

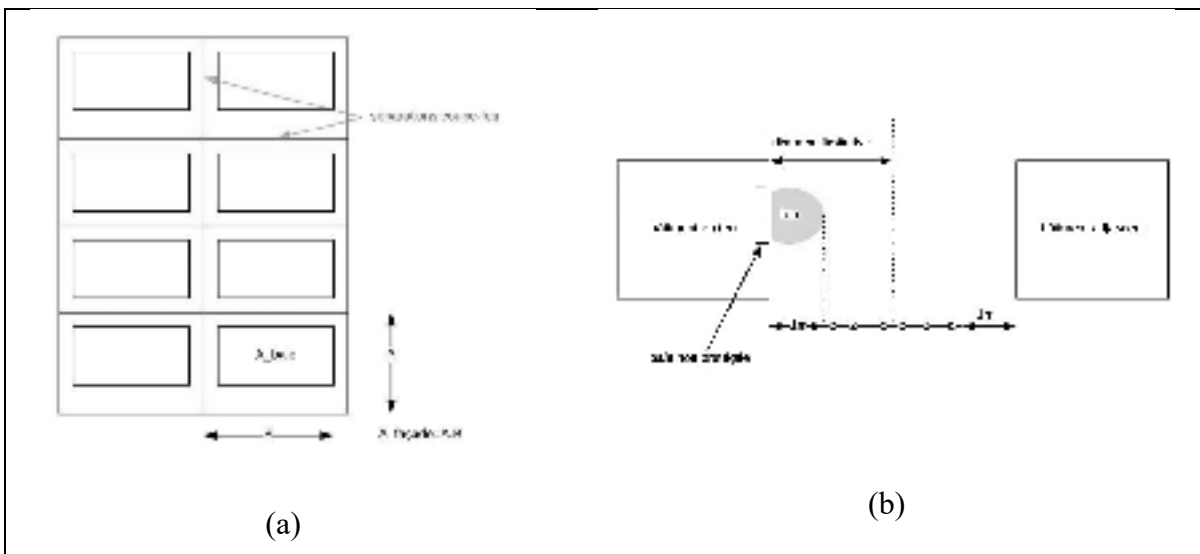


Figure 1.5 Représentation des (a) surfaces de façade de rayonnement (b) Distance limitative
Adaptée d'Institut de recherche en construction (1997) et de Torvi et al. (2005)

1.2.2 Résistance au feu

Dans un deuxième temps, le contrôle passif assure à la fois la stabilité structurelle du bâtiment, mais doit également contenir le feu dans le compartiment du degré de résistance donné. La résistance au feu est la composante la plus importante dans la protection passive (Buchanan & Abu, 2001). Les objectifs de la résistance au feu doivent être établis clairement avant de commencer la conception et le dimensionnement. Nous définissons trois critères :

- **stabilité** : capacité de soutenir les charges même quand l'élément est exposé au feu;
- **intégrité** : aucune fissure ne doit apparaître pour ne pas laisser passer les flammes ou la fumée;
- **isolation** : la température de la surface non exposée de l'élément doit être inférieure à : en moyenne 140°C et le maximum doit être inférieur à 180°C.

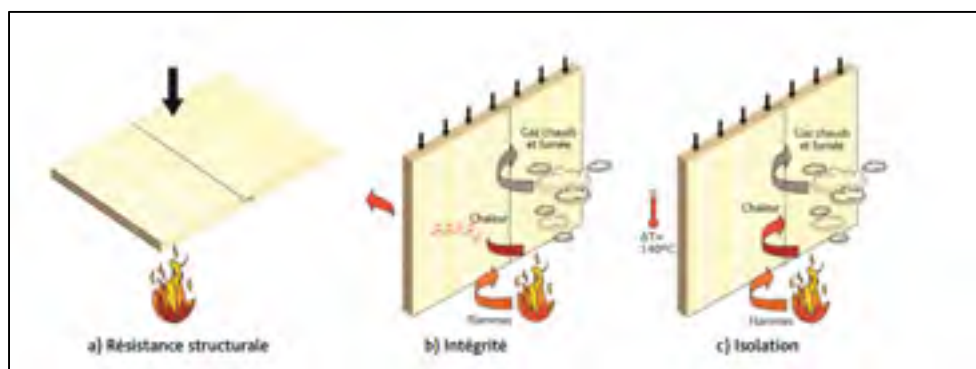


Figure 1.6 Trois critères d'évaluation d'un élément résistant au feu
Adaptée de FPIinnovations (2004)

Tous les éléments structuraux doivent posséder une résistance au feu pour essentiellement contrôler la propagation du feu et/ou prévenir la défaillance structurale. Certains éléments, comme des portes, n'ont pas besoin d'être testés par rapport à l'ensemble des critères, car elles n'ont pas la fonction de résistance structurale par exemple. La liste des critères à respecter est donnée dans le Tableau 1.4.

Les éléments qui vont avoir la fonction de contenir le feu sont les murs, les planchers et les portes. Il s'agit d'éléments qualifiés de séparations coupe-feu et de dispositifs d'obturation.

Le degré de résistance au feu implique ici qu'un système de construction consiste en la création de compartiments qui vont contenir le feu. Il s'agit également d'assurer l'intégrité des séparations coupe-feu. Ces éléments sont conçus par différentes disciplines lors de la conception, mais ils sont simultanément soumis à des contraintes de sécurité incendie.

Tableau 1.4 Critères d'évaluation exigés pour chaque élément résistant au feu
Adapté de Buchanan & Abu (2001)

Élément	Résistance structurale	Intégrité	Isolation
Porte		X	X
Fenêtre		X	
Mur porteur	X	X	X
Poutre	X		
Colonne	X		
Plancher	X	X	X

1.3 Intégration de la sécurité incendie au cours de la conception d'un bâtiment

La sécurité incendie est intégrée relativement tard dans le processus de conception (SFPE, 2011), bien que ce domaine comporte plusieurs interfaces avec les autres disciplines. L'ingénierie de la protection incendie est implicitement concernée par les problématiques résumés au Tableau 1.5 (Lataille, 2002; Buchanan & Abu, 2001).

Dans le domaine de l'architecture, il s'agit ici notamment des éléments de protection passive (limiter la propagation du feu) et de l'évacuation (disposition des routes de secours, taille des compartiments). L'électricité implique la prise en compte des éléments en lien avec la protection active, tel que les systèmes d'alarme pour enclencher l'évacuation et l'avertissement des autorités. La mécanique du bâtiment doit en même temps assurer les clapets coupe-feu pour la ventilation contrôlée afin de limiter l'apport en oxygène au feu et

limiter la propagation du feu, ainsi que le dimensionnement d'un système de désenfumage et du réseau d'alimentation afin d'assurer une distribution d'eau suffisante pour les gicleurs. Enfin, du point de vue structural, les éléments portants doivent être dimensionnés pour assurer le degré de résistance au feu requis, avec la continuité de ces éléments et assurer l'intégrité des assemblages.

Tableau 1.5 Synthèse des interfaces entre disciplines à considérer en protection incendie passive et active

Discipline	Interfaces
Architecture	Localisation du bâtiment Exposition du bâtiment Taille du bâtiment Taille des compartiments Disposition des espaces dans le bâtiment Matériaux de finitions et leur combustibilité Issues de secours
Électricité	Systèmes de contrôle du bâtiment Systèmes de détection et d'alarme Ascenseurs de secours Alimentation de secours Éclairage de secours
Mécanique du bâtiment	Protection des gaines du système de ventilation Système de désenfumage Système de gicleurs Réseau d'alimentation en eau
Structure	Degré de résistance au feu des éléments structuraux et leur intégrité Degré de résistance au feu des assemblages et leur intégrité Protection des ouvertures dans les éléments structuraux Choix de matériaux de construction Assurer les fonctions ci-dessus en cas d'inondations, séismes, neige et vent

Comme nous pouvons voir, souvent ces problématiques de la sécurité incendie concernent conjointement plusieurs disciplines, comme par exemple la protection des ouvertures dans les séparations coupe-feu. En effet, ces séparations relèvent de l'architecte ou de l'ingénieur de structure, or l'ouverture associée peut être due à un passage de gaine de ventilation, relevant de l'ingénieur mécanique. Il est donc nécessaire de gérer la pluridisciplinarité du problème.

L'avènement des nouvelles technologies, notamment l'approche BIM est connue pour favoriser la collaboration des différents acteurs (Eastman, Lee, Jeong & Lee, 2011; Botton, Forgues & Halin, 2018).

1.3.1 La modélisation des données du bâtiment

La modélisation des données du bâtiment (MDB), ou *Building Information Modeling* (BIM), est de plus en plus présente dans le secteur de la construction. Il s'agit à la fois d'un modèle de la conception générée par l'ordinateur et d'un processus de construction (Forgues, Staub-French, Tahrani & Poirier, 2014). Comme le précisent bien Eastman et al. (2011), le modèle numérique du bâtiment permet d'améliorer l'intégration de la conception, sous réserve que le BIM soit bien implémenté dans la pratique. Il est donc important de prendre en compte la maturité de l'entreprise et l'environnement quand des nouvelles pratiques, qui intègrent le BIM, sont proposées afin que celles-ci soient en adéquation avec la réalité. Dans le cadre de ce projet, l'accent sera mis davantage sur l'aspect du modèle numérique (*Building Information Model*) de l'approche BIM et sur les possibilités de modélisation paramétrique qu'elle offre.

1.3.1.1 Modélisation paramétrique

La modélisation paramétrique peut être décrite comme un ensemble de solutions plus adaptables et capables de faire face à des nouvelles situations qui arrivent au cours du projet (Schnabel, 2007). En effet, elle est définie de la manière suivante :

Object-based parametric modeling was originally developed in the 1980s for manufacturing. It does not represent objects with fixed geometry and properties. Rather, it represents objects by parameters and rules that determine the geometry as well as some nongeometric properties and features. The parameters and rules can be expressions that relate to other objects, thus allowing the objects to automatically update according to user control or changing contexts. (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011) p.31

Ainsi, le comportement des objets par rapport au changement de contexte peut être une fonctionnalité intégrée (comme le prolongement d'un mur quand un mur adjacent à ce dernier est déplacé), ou même le décalage vertical des planchers. Ce lien de dépendance entre les différents objets peut être automatique ou doit être spécifié par l'utilisateur dans les logiciels BIM. Par exemple, les espaces peuvent être aujourd'hui générés automatiquement à partir d'un ensemble de murs et planchers qui forment un ensemble fermé. La composante verticale (la hauteur d'une pièce) est ensuite déterminée par la hauteur moyenne du plafond de l'étage (Eastman et al., 2011).

Ainsi, le modèle BIM contient un certain nombre de données qui peuvent être exploitées de différentes manières : planification et visualisation, évaluation des coûts, efficacité énergétique, etc. La modélisation paramétrique basée sur le BIM a prouvé ses atouts dans le domaine de la création, permettant d'ajuster la conception dans son ensemble plus facilement en cas de changement et de redimensionnement. Or il est également possible de récupérer les données dans la maquette afin de les analyser davantage. Afin de retirer un certain type de contenu, il est important d'utiliser une bonne classification de ces objets. Il s'agira donc d'un des premiers paramètres non-géométriques de ces derniers qui pourront être examinés.

1.3.2 Classification des objets

Les objets BIM sont classifiés hiérarchiquement, il existe plusieurs classifications qui peuvent être considérées selon l'environnement dans lequel nous travaillons. D'une part, il y a la hiérarchie d'objets IfcProduct selon le standard IFC (Figure 1.7), d'autre part il est

possible d'utiliser la classification d'un logiciel BIM, tel que la classification (en catégories, familles et types) proposée par Revit (Figure 1.8). Enfin, il existe des standards de classification, notamment Uniformat II, Omniclass (Tableau 1.6) ou Masterformat (Tableau 1.7). Chaque classification est adaptée à différents objectifs. Botton, Rivest, Forgues & Jupp (2018) soulignent qu'un document doit utiliser un système de classification pour structurer les données et ils comparent ces différents systèmes. Afin de créer un lien entre le modèle BIM et la classification, il est nécessaire de créer et d'assigner les paramètres partagés ou bien à l'aide d'un plug-in d'interopérabilité dans le logiciel.



Figure 1.7 Hiérarchie d'un objet IfcProduct

Tirée de buildingSMART (2017a)

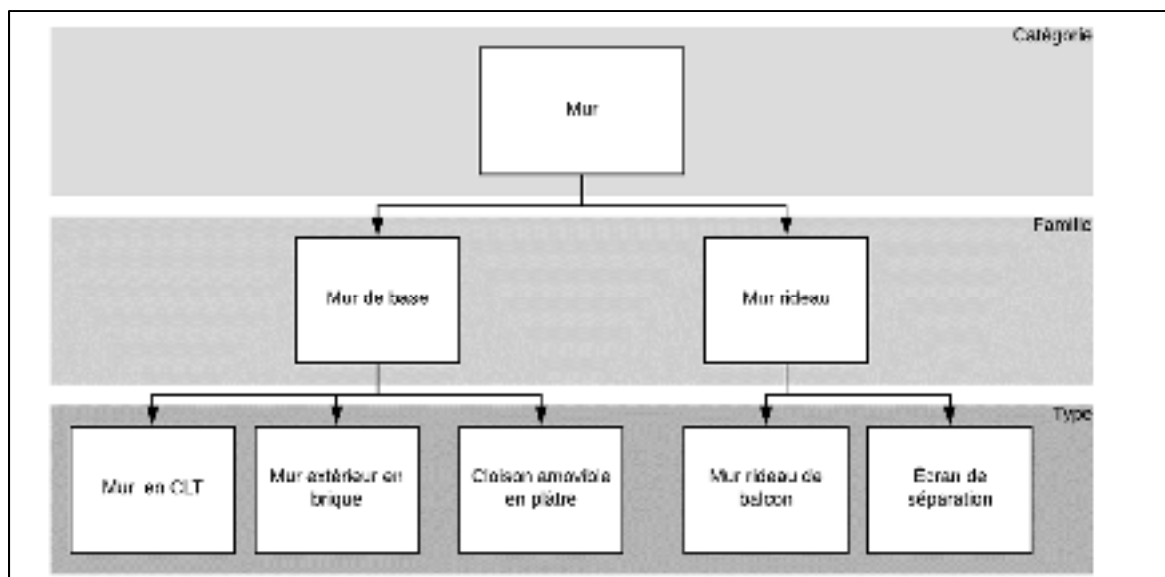


Figure 1.8 Exemple d'hierarchie d'une catégorie mur comme présenté dans Revit

Tableau 1.6 Exemple de classification Uniclass II pour les murs
Adapté de Chabot (2015)

Éléments	Niveau de classification
B Superstructure et enveloppe	Niveau 1
B20 Enveloppe extérieure	Niveau 2
B2010 Murs extérieurs	Niveau 3
B201001 Ossature murs extérieurs	Niveau 4
B201002 Système d'étanchéité d'enveloppe	
C Aménagement intérieur	Niveau 1
C10 Construction intérieure	Niveau 2
C1010 Cloisons intérieures	Niveau 3
C101001 Cloisons fixes	Niveau 4
C101002 Cloisons démontables	

Tableau 1.7 Exemple de classification Masterformat 2016 pour le béton
Tiré de Construction Specifications Institute (2016)

Éléments	Niveau de classification
03 00 00 Béton	Niveau 1
03 01 00 Entretien du béton	Niveau 2
03 01 10 Entretien des coffrages et des accessoires	Niveau 3
03 01 20 Entretien des armatures	
03 01 23 Entretien des chevilles d'ancrage	
03 01 30 Entretien du béton coulé en place	
03 01 30.51 Nettoyage du béton coulé en place	Niveau 4

Tableau 1.8 Exemple de classification Masterformat 2016 pour la construction en bois massif
Tiré de Construction Specifications Institute (2016)

Éléments	Niveau de classification
06 00 00 Bois, plastiques et composites	Niveau 1
...	Niveau 2
06 13 00 Construction en bois massif	
06 12 13 Construction rodin	Niveau 3
06 13 13.91 Elements horizontaux en bois rond	Niveau 4

Il est donc possible d'exploiter la sémantique de ces objets créés par les architectes et ingénieurs du point de vue de la sécurité incendie. En effet, une des dernières approches qui prennent de plus en plus d'ampleur, notamment dans le domaine de la recherche (Figure 1.9), est la vérification automatisée de la conformité des modèles par rapport aux codes du bâtiment.

1.4 Vérification automatisée basée sur le BIM de la conformité par rapport aux codes

L'approche de la vérification automatisée de la conformité des modèles par rapport aux codes est un domaine établi avec plusieurs études existantes (Figure 1.9). Il est possible de remarquer qu'il existe un certain nombre de travaux pour automatiser la vérification de conformité des plans et des modèles de construction. D'abord représenté par des projets ponctuels, le sujet prend plus d'importance dans la littérature avec l'avènement du format d'échange IFC. Il s'agit cependant d'un domaine qui reste encore assez peu mis en pratique dans la construction (Solihin & Eastman, 2015). Eastman, Lee, Jeong & Lee (2009) examinent davantage l'approche méthodologique et ainsi utilisent cinq solutions commercialisées afin de présenter l'état de l'art dans le domaine de la vérification automatisée. Pour ce faire, ils définissent quatre étapes d'un processus de vérification des règles, avec des critères fonctionnels détaillés. Le processus est constitué de l'interprétation des règles, la préparation du modèle de construction, l'exécution des règles et le rapport de vérification. Ce cadre de travail a établi une base solide pour la suite des recherches. Depuis lors, plusieurs travaux ont été réalisés pour proposer des solutions concernant une ou plusieurs de ces étapes. Ces travaux seront donc analysés dans la suite.

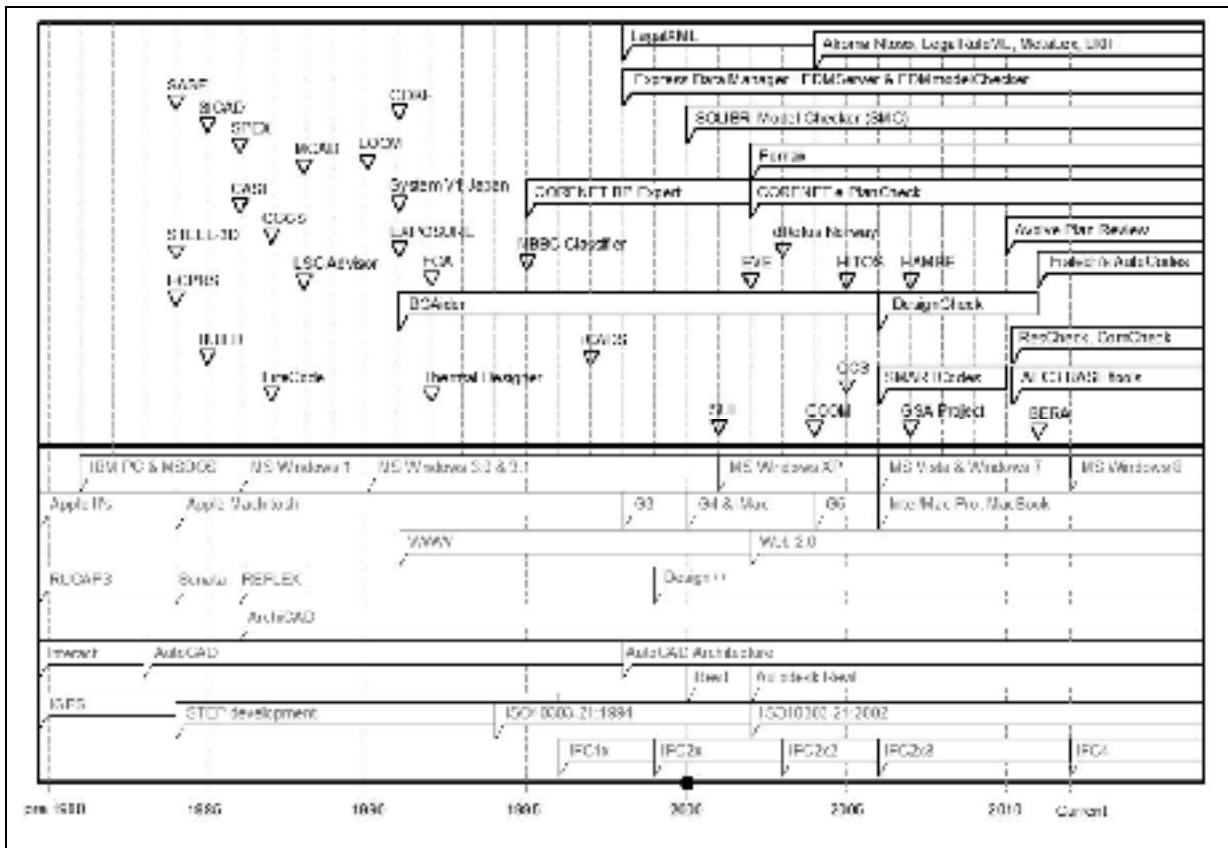


Figure 1.9 Survol général de l'histoire des solutions existantes de vérification automatisée
Tirée de Johannes Dimyadi & Amor (2013a)

D'après différentes études récemment publiées (Kim et al., 2017; Malsane, Matthews, Lockley, Love, & Greenwood, 2015; Norén, Strömgren, & Nystedt, 2017; Preidel & Borrmann, 2016; Solihin & Eastman, 2015; Spearpoint, 2005), nous pouvons classer les défis de la vérification automatisée de règles en cinq étapes: analyse de codes, construction des règles, définition des exigences en informations BIM, préparation du modèle BIM, exécution de la vérification et rapport de vérification. Dans la section suivante, les travaux de recherches développés à partir de Eastman, Lee, Jeong, & Lee (2009) vont être étudiés pour chacune de ces étapes.

1.4.1 Analyse des codes

L'analyse des codes peut être définie comme le moyen d'extraire la sémantique des clauses écrites dans les codes du bâtiment et de les structurer en vue de les présenter sous format orienté objet compatible avec le BIM. Les données restent représentées en langage humain.

1.4.1.1 Différentes catégories de clauses

Premièrement, Nawari (2018) propose une définition de quatre catégories de clauses différentes, correspondant à différents types de règles :

- **Provisoire:** Il est possible de transformer directement le texte en question en un ensemble de règles basées sur des objets. Ces règles spécifient des valeurs précises de contraintes;
- **Dépendant:** Ce terme définit les clauses dépendantes d'une ou de plusieurs propositions. La transformation directe peut être compliquée, dû au lien de l'information avec des données contenues dans les clauses différentes. Il est possible que leur vérification doive se faire manuellement.
- **Ambigu :** les propositions sont subjectives, elles contiennent souvent des expressions telles que *environ* ou *relativement*. Elles ne peuvent pas être traduites en langage automatique et nécessitent donc une réécriture sauf en utilisant des procédés avancés en informatique.
- **Contenu:** Ce sont le plus souvent des clauses qui comportent des définitions et fournissent des informations concernant des concepts de construction (tel que les essais). Il peut s'agir de définitions de résistance au feu comme de l'évacuation de la fumée. Cette classe ne permet pas la traduction en règles, car le contenu ne peut pas être traduit en expression 'vrai' ou 'faux';

En comparaison, Malsane et al. (2015) utilisent seulement trois catégories différentes, qu'ils appellent des filtres sémantiques.

- **Clauses déclaratives:** Ces clauses sont interprétables par un ordinateur, leurs assertions sont basées sur des contraintes (la réponse est de type ‘vrai’ ou ‘faux’), les données à respecter sont évidentes. Les auteurs priorisent le traitement de ce type de clause en premier lieu.
- **Clauses informatives :** L'information contenue n'est que partiellement sujette à la transformation automatisée et il est nécessaire d'interpréter leur sens spécifiquement.
- **Non interprétables:** Cette catégorie considère les exceptions et les cas particuliers. L'interprétation de ces propositions n'est pas possible même si elle est effectuée manuellement. Nous pouvons prendre un exemple de phrase pour illustrer ce cas: *nécessité d'obtenir un certificat si un système d'alarme est installé.*

Par conséquent, les auteurs suggèrent que tout un groupe de clauses ne soit pas du tout considéré. Nous ne pouvons cependant pas les exclure d'une analyse ultérieure, mais plutôt les mettre de côté pour un traitement alternatif (Nawari, 2019). Pour conclure, le Tableau 1.9 résume les correspondances sémantiques entre les deux méthodes de classification possibles présentées ci-dessus. Il peut être remarqué, que le sens des deux catégorisations est très rapproché.

Tableau 1.9 Correspondances sémantiques de deux catégorisations différentes

Malsane et al. (2015)	Nawari (2018)
Clause déclarative	Provisoire
	Dépendant
Clause informative	Ambigu
Clauses restantes inadéquates à la transformation	Contenu

1.4.1.2 Approche manuelle d'analyse

Une fois la classification terminée, il est possible de cartographier les informations à extraire. Nawari (2018) suggère une méthode utilisant les exigences d'échanges d'informations

appelée par le standard buildingSMART les *information exchange requirements* ou exigences d'échange d'information. Cependant, nous parlons ici d'échanges entre les textes de réglementation et le schéma de modèle BIM, par opposition à la définition habituelle de l'échange d'information, dans laquelle différents acteurs d'un projet s'accordent sur un protocole de transmission des données dans la maquette (BuildingSMART, 2012; Nawari, 2018). Les informations nécessaires sont extraites pour chaque objet de chaque clause étudiée: la nature des données, les contenus nécessaires des données, si l'information est obligatoire ou facultative, le type des données et les unités.

Malsane et al. (2015) abordent la question de la cartographie sémantique d'une manière similaire à celle de Nawari (2018). Chaque clause est considérée séparément et mise en contexte avec des entités physiques (y compris des propriétés et des attributs). Ainsi, nous obtenons des objets sémantiquement riches, ce qui signifie que les objets montrent des relations avec leurs propriétés associées. L'analyse des normes de Malsane et al. (2015) se déroule comme suit: isoler chaque entité du texte de réglementation, fixer la classe de chaque objet contenu dans le texte, définir des attributs associés et, enfin, établir la nature du lien entre les différents attributs des différents objets (entier, booléen, chaîne de caractères, énumération). Le but de cette extraction de données est de pouvoir reconstituer les informations dans un format orienté objet. La classification est faite par rapport à chaque élément concerné (par exemple, un mur). Les attributs (taille, matériau, etc.) sont associés à chaque élément principal dans les différentes clauses. Dans la proposition des auteurs, les attributs sont toujours combinés en référence à l'élément principal.

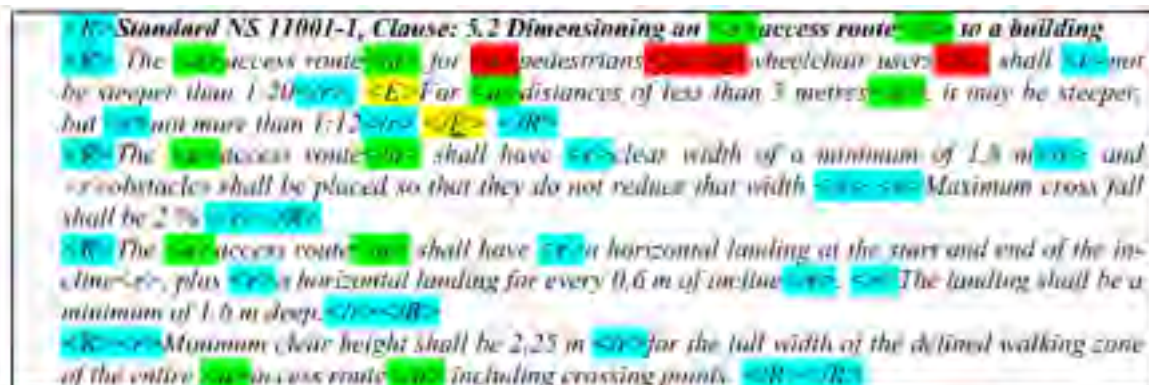
Enfin, la génération de règles de vérification KBIMCode (Kim et al., 2017) est proposée pour la loi coréenne sur la construction. Le travail prend une phrase originale et en décompose le sens en phrases atomiques. Les phrases atomiques sont composées des données essentielles: sujet, verbe et objet (Lee, Lee, Park, & Kim, 2016), qu'il convient de séparer entre les expressions de condition et de contenu. Les phrases traduites sont ensuite configurées en objets ou fonctions et leurs propriétés avec les valeurs associées. Cette décomposition en éléments essentiels permet de procéder à la construction et à la programmation des règles.

1.4.1.3 Language de balisage

Le projet RASE est défini par les quatre mots clés Exigence (*Requirement*), Applicabilité (*Applicability*), Sélection (*Selection*), Exception (*Exception*) (Hjelseth & Nisbet, 2011). Il s'agit de l'une des méthodes les plus citées dans l'analyse automatisée de règles basée sur le BIM. Développée par la société AEC3, la méthode RASE a été utilisée en particulier au Royaume-Uni pour le système britannique InnovateUK RegBIM, où des normes et certifications environnementales ont été ainsi évaluées (Beach, Rezgui, Li, & Kasim, 2015; buildingSMART, 2017b).

Les annotations soulèvent les rôles fonctionnels des groupes nominaux et paragraphes clés (buildingSMART, 2017b). Un règlement, selon Hjelseth et Nisbet (2011), est un ensemble de points à vérifier. La recherche propose donc de caractériser chaque élément de vérification par un ensemble de quatre constructions distinctes: 1) exigence, 2) applicabilité, 3) sélection, 4) exception. Les auteurs estiment que ces quatre concepts sont suffisants pour une représentation textuelle efficace et fiable. Ainsi, pour quantifier une règle, les quatre concepts sont ensuite associés aux attributs suivants correspondant aux clauses: sujet, propriété, comparateur et valeur cible. Ceci génère ensuite un tableau pour chaque règle qui permet de reconstruire de manière réversible le texte écrit (Hjelseth & Nisbet, 2011). Ensuite, pour rendre les règles calculables, il est nécessaire de transformer les balises RASE en règles calculables par un algorithme unique récursif (Hjelseth & Nisbet, 2010). Ainsi, cette transformation et la compréhension du processus nécessitent des connaissances informatiques approfondies, en termes de langages de codage, d'interopérabilité et de transfert d'informations.

Figure 1.10 Exemple de balisage d'une clause réglementaire
Tirée de Hjelseth et Nisbet (2011)



En plus de la méthode RASE, d'autres méthodes sur la traduction en langage humain ont été rapportées (İlal & Günaydın, 2017; Zhang & El-Gohary, 2017). Cependant, ces méthodes permettent uniquement de capturer les valeurs cibles et les données explicites et ne prennent pas en compte l'interprétation de la signification de la règle et de ses éventuelles ambiguïtés ou subjectivités. Nous devons donc tenir compte du postulat de Solihin et Eastman (2015) qui affirment que pour traduire une clause réglementaire de manière complète et significative, il est nécessaire de recourir à une traduction manuelle. En effet, l'ordinateur ne pourra pas se substituer aux connaissances d'expertise du domaine étant donné la forme sous laquelle sont aujourd'hui écrits les textes de réglementation.

1.4.2 Construction des règles

La littérature identifiée à cette étape présente différentes méthodes de construction de règles. Elles sont basées sur la sémantique extraite dans l'étape précédente.

Nawari (2018) représente d'abord les exigences d'échange définies précédemment sous forme de *Model View Definition* (MVD) qui sont ensuite transformées dans le langage ifcXML par une approche proposée précédemment par l'auteur (Nawari, 2012). Ce cadre repose sur plusieurs technologies de l'information, notamment ifcXML et LINQ. Le langage XML (*Extensible Markup Language*) est un langage conçu à l'origine pour répondre aux

besoins de l'édition de documents électroniques à grande échelle. Or cette méthode nécessite certaines compétences informatiques qui ne sont pas communes pour un professionnel de la construction (Solihin & Eastman, 2015). Ce même défi concernant l'expertise informatique est rencontré dans l'approche de vérification de l'évaluation des concepts du bâtiment durable (Beach et al., 2015). En effet, les mark-ups RASE doivent être convertis en un format lisible par ordinateur, ici exécuté en SWRL (*Semantic Web Rule Language*). Les résultats booléens sont obtenus si l'exécution de la règle est possible, sinon il est possible de rajouter dans cette solution une propriété manquante pour pouvoir mener à bien la vérification.

Un autre moyen de construire des règles (qui serait plutôt à éviter) est un outil codé en mode de boîte noire. Il peut s'agir d'un plug-in d'un logiciel de modélisation BIM tel que Revit (Nguyen & Kim, 2011; Porto, Franco, Correa, Alves, & Baracho, 2015) ou d'un logiciel développé à part (par exemple, Solibri Model Checker). Tout d'abord, la construction des règles qui est programmée en dur ou non accessible n'est pas une approche viable dans le contexte des normes qui sont en constante évolution dans le secteur de la construction.

Enfin, dans le projet KBIM (Kim et al., 2017; Lee et al., 2016), une fois que les phrases atomiques sont configurées, les informations sont traduites en une unité arithmétique et logique. Le lien nécessaire entre le code et les informations BIM n'est pas abordé par Lee et al. (2016). Cependant, une méthode incluant le langage visuel KBIM Visual Language est proposée par Kim et al. (2017). En effet, ces auteurs définissent quatre types de nœuds nécessaires et préconisent la définition de méthodes de base telles que *getResult()* pour afficher le résultat ou *getFloorNumber()* pour renvoyer un numéro d'étage. Bien que Kim et al. (2017) abordent l'aspect de relation entre la règle implémentée et le modèle de construction, ils ne précisent pas la portée de l'outil, notamment sa capacité à prendre en compte les relations spatiales entre les éléments ainsi que la dérivation des paramètres.

De la même manière que Kim et al. (2017), la contribution de Preidel & Borrmann (2015) consiste à démontrer qu'un langage de représentation de code formel permet de vérifier le

respect du code. En effet, ils expriment des préoccupations concernant le déficit de recherche en ce qui concerne l'expression des exigences géométriques et non géométriques, ainsi que de l'accessibilité pour les experts du domaine. Les deux travaux proposent une représentation visuelle du langage de programmation basée sur son accessibilité en termes de compréhension et de visualisation pour les non-experts en programmation. En effet, des méthodes élémentaires qui seront indépendantes d'un quelconque test de conformité seront codées et ensuite les professionnels auront seulement à construire leurs programmes de vérification afin de valider la vérification faite. Ainsi, deux critères de mise en œuvre sont définis par Preidel & Borrmann (2015): les nœuds de programmation doivent être définis de manière aussi générique que possible et doivent être décomposés à leur niveau le plus bas. Les auteurs définissent les méthodes atomiques essentielles dans un nouveau langage de programmation, le *Visual Code Checking Language* (VCCL) et *KBim Visual Language* (Kim et al., 2017) pour construire une vérification informatique efficace (Preidel & Borrmann, 2016) et facile d'utilisation (Kim et al., 2017).

Plusieurs tentatives (Ghannad, Lee, Dimyadi, & Solihin, 2019; Kim et al., 2017; Preidel & Borrmann, 2015) visent à développer un outil incluant la programmation visuelle et qui semble répondre à un principe clé défini par Solihin & Eastman (2015), c'est-à-dire la possibilité de réutiliser une structure de règles pour réduire les coûts de mise en œuvre. Cette méthode de représentation semble alors être un outil prometteur pour la construction de règles de vérification de conformité.

Preidel & Borrmann (2016) et Kim et al. (2017) définissent tous un nouvel outil de construction et de vérification de règles qui semble répondre aux exigences nécessaires en matière d'accessibilité informatique et à la possibilité de créer de nouveaux jeux de règles. Cependant, ils ne traitent pas du lien entre l'outil de vérification des règles et les exigences en matière d'informations de modèle de construction. En effet, il est essentiel de définir ce qui doit être présent dans un modèle de construction pour que le contrôle soit réussi, ainsi que la méthode pour extraire ces informations du modèle et les rendre compatibles avec les règles construites.

1.4.3 Exigences d'informations dans le modèle BIM

1.4.3.1 Base des données

La sémantique extraite dans l'analyse des règles doit être transformée et organisée dans un format compatible avec le modèle BIM dans cette étape. La littérature correspondante doit avant tout présenter les challenges associés au lien entre l'implémentation des règles et le modèle, et discuter la présence des données nécessaires spécifiquement pour la sécurité incendie.

Comparés aux efforts de traduction des normes et de construction des règles, peu d'auteurs ont abordé l'étape relative aux exigences d'information BIM et à la préparation du modèle de construction. En effet, des auteurs (Norén et al., 2017; Rüppel & Schatz, 2017; SFPE, 2011) émettent des recommandations générales concernant la modélisation BIM et l'intégration de la sécurité incendie, mais il existe un manque de références en termes d'exigences spécifiques. Les auteurs nous rappellent à plusieurs reprises qu'il faut maintenir des liens étroits entre les documents textuels et les règles (Beach et al., 2015), or des liens solides doivent être également maintenues entre le document textuel et le modèle BIM. Cela est notamment évoqué par une nécessité de définir une librairie de concepts, propriétés et géométries (Belsky, Sacks, & Brilakis, 2016).

Afin de maintenir au maximum le principe de neutralité de l'information, le schéma IFC est généralement privilégié afin de bâtir la base de données d'informations nécessaires. Cela est possible en créant un sous-schéma IFC avec uniquement les propriétés nécessaires (MVD), à partir des informations recensées dans l'étape d'analyse du code (Nawari, 2018). L'approche repose généralement sur des *Information Delivery Manuals* (IDM) correspondant à chaque clause. Cela favorise toutefois la redondance de l'information et donc pour cela des travaux cherchent à développer une méthode pour développer une organisation d'information par le logiciel de modélisation ontologique (Lee et al., 2016). Cela permettrait de générer de manière automatisée des MVDs adaptés aux besoins spécifiques. Or il s'avère que les exigences normatives liées à la sécurité incendie présentent des spécificités concernant les

données requises. Celles-ci ne sont pas toujours présentes dans le schéma IFC ou alors leur valeur n'est pas explicitement présente dans le modèle, alors que dans cette approche le MVD est généré à partir de l'outil IfcDoc qui repose essentiellement sur le schéma de l'IFC.

Il a été montré que le schéma IFC peut s'avérer insuffisant concernant la schématisation de toutes les informations nécessaires pour mener à bien une vérification automatisée (Greenwood, Lockley, Malsane & Matthews, 2010). Il est alors nécessaire de proposer une extension du schéma IFC (Malsane et al., 2015) pour la vérification des règles de conformité. A la fin, nous obtenons une proposition de format IFC pour chaque objet concerné telle que présentée dans la Figure 1.11. Malgré cela, cette méthode ne prend pas en compte la possibilité des propriétés dérivées. Par exemple, dans la Figure 1.11, l'une des propriétés proposées est la Distance à partir du mur, pour laquelle l'auteur ne précise pas comment la propriété est obtenue. Cela nous mène à croire que la valeur doit être mesurée et insérée manuellement et individuellement pour chaque valeur, ce qui favorise l'erreur et contribue à augmenter la charge de travail du modelleur. Il s'avère nécessaire de pouvoir indiquer comment la valeur d'un paramètre donné est récupéré (automatique, dérivation ou saisie manuel).

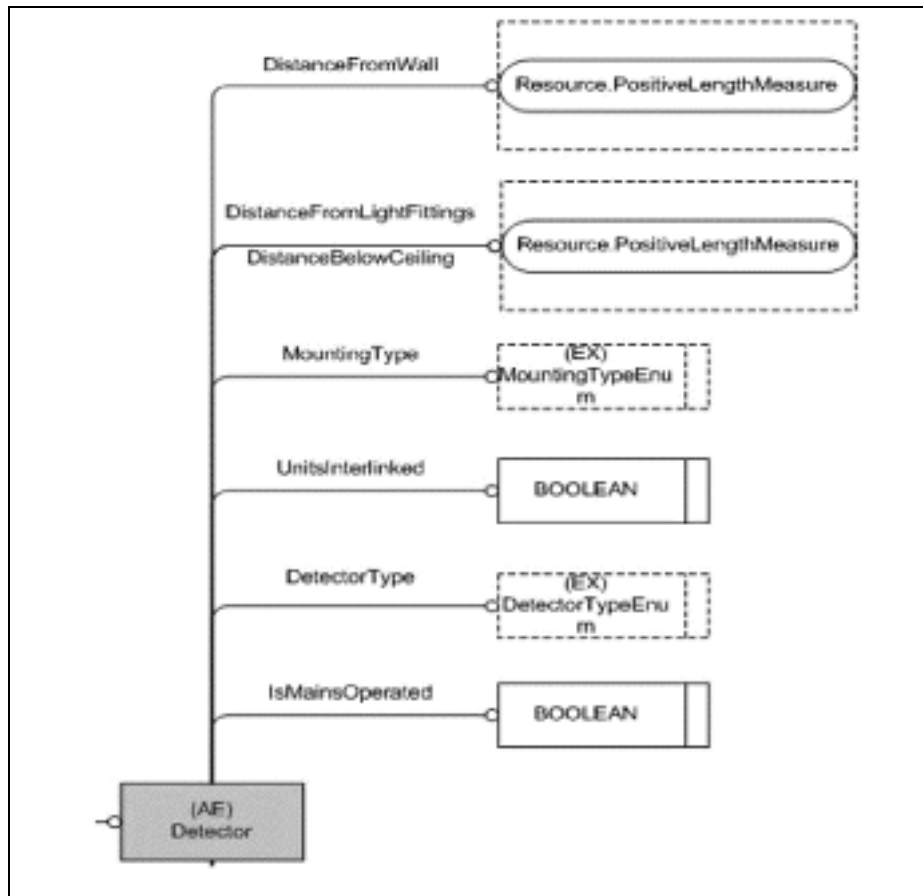


Figure 1.11 Exemple d'objet IFC étendu
Tirée de Malsane et al. (2015)

Beach et al. (2015) proposent une construction de différentes ontologies pour séparer différents types d'information (Figure 1.12). Il est supposé que cela permet de conserver une méthode très générique et de personnaliser les informations contenues dans le système. Par conséquent, « un recensement de la sémantique de l'ontologie de la réglementation sur celle de l'ontologie du format de données » (Beach et al., 2015) doit être effectué. Cela se fait à deux niveaux différents : le recensement est fait d'abord au niveau des classes d'objets, où les relations sont individuelles pour chaque classe d'objets entre l'ontologie de la réglementation et l'ontologie du format de données. Ensuite, le niveau des propriétés des objets est recensé: les propriétés des règles peuvent être associées à un paramètre spécifique du modèle (recensement un à un), ou bien la donnée requise est associée à plusieurs paramètres du modèle (recensement un à plusieurs). Dans ce deuxième cas, une valeur du

domaine de réglementation doit être calculée à partir de plusieurs éléments de données du domaine de format de données.

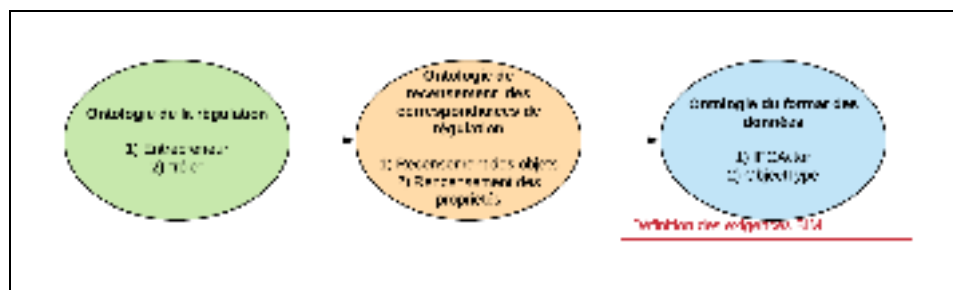


Figure 1.12 Proposition de recensement des données
Adaptée de Beach et al. (2015)

Afin de pallier le manque d'informations dans le schéma IFC, les auteurs de l'approche par ontologies développent une interface utilisateur dans le but de vérifier la conformité à la certification BREEAM (Beach et al., 2015). Dans le prototype de l'interface, il est possible à la fois d'effectuer des calculs et ensuite de déduire des données dérivées des informations recensées grâce aux ontologies, ainsi que de compléter les données manquantes et nécessaires directement dans l'interface. Cette approche est donc capable de prendre en compte les données dérivées. Cependant le développement de cette fonctionnalité a recours à un programme interne, non accessible à l'utilisateur, ce que nous cherchons à éviter au maximum.

De plus, pour une transformation plus cohérente des informations concernant les exigences de sécurité incendie, un logiciel de type *model checker*, comme par exemple SimpleBIM est utilisé dans une des approches (Taciuc et al., 2016). En effet, ce type de logiciel vérifie la validité et la qualité du modèle en termes de structure des données. Cependant il ne s'interroge pas sur les valeurs cibles des données contenues. Cet outil ne peut représenter que des objets et des propriétés explicites et ne permet pas la dérivation des paramètres, fonctionnalité nécessaire pour une vérification de conformité du modèle.

Enfin, les approches précédentes, peu nombreuses, sont toujours exposées dans un contexte spécifique (certification de bâtiment durable ou de sécurité incendie au Danemark) mais il n'est pas étudié si le schéma IFC est suffisant pour les différents cas de figure. En effet, les travaux de recherche vont définir comme base de librairie le schéma IFC pour la vérification automatisée. Or, étant donné les spécificités du domaine de la sécurité incendie, il est nécessaire d'étudier l'applicabilité à celui-ci. Ainsi, certains auteurs s'intéressent à la compatibilité du format IFC avec les logiciels pour la modélisation de l'incendie (Dimiyadi, Solihin, & Amor, 2018; Spearpoint, 2005). Ces derniers sont basés sur la mécanique des fluides numériques (CFD), comme par exemple l'outil Fire Dynamics Simulator (FDS) (Dimiyadi, Spearpoint, & Amor, 2008). Les objets et les attributs du modèle BIM sont alors recensés en lien avec les données requises par le logiciel CFD. Dans le cas de la vérification automatisée, le recensement doit se faire entre le modèle BIM et les clauses de réglementation qui comportent un plus grand nombre d'informations à examiner. Ainsi, il s'avère nécessaire d'étudier davantage dans la suite, les besoins spécifiques du CNBC en termes de données nécessaires pour la vérification automatisée.

1.4.3.2 Préparation du modèle

Une fois les données requises formalisées, le modèle BIM du bâtiment doit être préparé pour la vérification des règles. Cette étape traite de l'application des exigences et des méthodes préconisées. Dans les sections précédentes, les approches pour formaliser les résultats dans le but de les utiliser dans la vérification du modèle ont été définies. Avec le recensement des données, il s'agit de définir comment ces exigences doivent être mises en place en prenant en compte le fait que le modèle de bâtiment doit contenir des informations spécifiques que nous devons définir. Les exigences BIM doivent maintenir un lien avec les règles calculables ainsi que les règles de texte. Cependant, nous devons également prendre en compte l'intégration actuelle du BIM dans des projets réels. En effet, Solihin & Eastman (2015) rappellent que la nécessité de saisir manuellement les données dans la maquette devrait être minimale, cela veut dire que le schéma proposé par Malsane et al. (2015) par exemple (Figure 1.11) ne serait pas composé uniquement de paramètres explicitement rajoutés par le modelleur.

C'est ainsi que Solihin & Eastman (2015) proposent quatre catégories de contrôle pour les différentes règles en se basant sur la nature d'information qu'ils abordent. Il s'agit de paramètres basés sur des données explicites, des données dérivées simples, une structure de données étendue, ainsi que d'une analyse basée sur les performances. Le but de ces auteurs est de donner un cadre théorique formalisé pour le développement de nouvelles solutions. Il faut donc également que l'outil choisi pour la vérification automatisée soit capable de supporter ces différentes catégories de manipulation des données dans le modèle.

Les travaux de recherche cherchent à traduire les règles écrites en un langage humain et se concentre principalement sur l'aspect logique de la traduction des règles, mais n'explique pas comment les données BIM doivent être codées dans le modèle de construction et comment les règles programmées utiliseront ces données. Les études précédentes ne traitent pas non plus du problème posé par des informations incomplètes sur les données de la sécurité incendie et ne fournissent pas de recommandations à ce sujet. Par conséquent, nous devons relever ce défi, sinon il semble impossible de procéder à une vérification cohérente et complète des règles de sécurité incendie.

1.4.4 Exécution et rapport de vérification des règles

L'exécution des règles sur le modèle de construction formalisé donne lieu à un rapport de résultats. Ce rapport peut être présenté sous forme textuelle ou graphique et le contenu des informations dépend des besoins et de la mise en œuvre des règles.

Deux méthodes de création de rapports peuvent être définies (Eastman, 2009): la création de rapports graphiques ou alors la référence à la clause de référence dans le code du bâtiment. Le rapport graphique est plus développé dans les solutions disponibles dans le commerce comme le Solibri Model Checker (SMC) (Li, 2015) ou Fornax (Solihin, Shaikh, Rong & Lam, 2004), ce qui renforce le lien entre le modèle et l'utilisateur.

Les travaux de recherche se concentrent principalement sur la présentation des résultats de leurs exemples d'application. Nous avons divisé les études de cas en deux catégories: (1) les résultats de vérification de conformité avec SMC et (2) les résultats de l'approche de recherche.

(1) La vérification avec SMC a été appliquée à diverses réglementations dans certains travaux, dont trois principaux qui se concentrent sur la sécurité incendie ou présentent un niveau d'implémentation très mature :

- Réglementation danoise BR10 9 (sécurité incendie): (Taciuc et al., 2016)
- Code du bâtiment de la Chine (règlement sur la sécurité incendie): (Li, 2015)
- Administration des services généraux (GSA), accessibilité des tribunaux américains: (Eastman, 2009).

(2) Les meilleures pratiques tirées des études peuvent être utilisées à partir des différentes approches de recherche qui ont montré une application sur certains éléments des réglementations suivantes :

- Certification BREEAM: (Beach et al., 2015)
- Loi coréenne sur la construction: (Kim et al., 2017)
- Code international du bâtiment (IBC) 2009: (Nguyen & Kim, 2011)
- Code de construction allemand: (Preidel & Borrmann, 2016)

Il reste toutefois à remarquer que les exemples sur lesquels sont prouvés les différents travaux sont très isolés et n'offrent pas un point de vue plus général, principalement en termes de potentiel d'application globale à un certain type de réglementation. L'étude la plus avancée à cet égard est le projet KBIMCode.

1.5 Résumé

Sur la base d'une revue de la littérature, il est maintenant possible d'établir un processus global comprenant cinq étapes différentes. Ce processus commence par relever le défi de la

traduction des textes de règlement formulés pour être compris par les humains, vérifiés manuellement et terminés par la production d'un rapport automatisé.

En conclusion, il manque une **méthode cohérente complète** couvrant le processus de vérification des règles dans son intégralité, en relevant le défi du transfert d'informations d'une étape à une autre (Figure 1.13). Si une méthode donne des résultats prometteurs (par exemple Beach et al. (2015)), son application s'avère actuellement difficile au contexte de la construction en bois au Canada. Un deuxième exemple de projet de recherche très avancé a été évalué comme étant l'approche KBIMCode. Cependant, celui-ci ne traite pas suffisamment la question de la préparation du modèle de construction et de l'interaction entre le modèle de construction et l'outil de vérification des règles. Ces méthodes proposées sont également exigeantes en termes de connaissance de la programmation, notamment par développement de divers interfaces graphiques qui communiquent avec l'utilisateur. Notre objectif est alors de créer un **outil plus accessible, au fonctionnement transparent**, pouvant être davantage personnalisé en fonction du contexte réglementaire utilisé, et mis à jour par l'utilisateur si la réglementation change.

Le contexte de sécurité incendie est très large et touche à plusieurs interfaces du processus de construction et par extension à plusieurs manières de construire les modèles. Nous allons donc réduire l'étendu du sujet sur l'étude des éléments de **protection feu passive**. Le travail va donc chercher à montrer comment proposer une méthode globale et complète de construction de règles, appliquée à la sécurité incendie et à la construction en bois dans le contexte normatif canadien. Le défi à relever est l'applicabilité de la méthode dans le contexte réel.

Par ailleurs, la définition des bibliothèques ou bases de données pour faire le lien entre le texte et les règles de vérification en prenant en compte l'intermédiaire qui est le modèle BIM n'est pas abordée en détail dans les travaux de recherche. Des approches de recensement des besoins d'informations ont été proposées en utilisant comme base le schéma IFC. Or les particularités et la complexité de la réglementation liée à la sécurité incendie amène à s'interroger sur les besoins spécifiques en information.

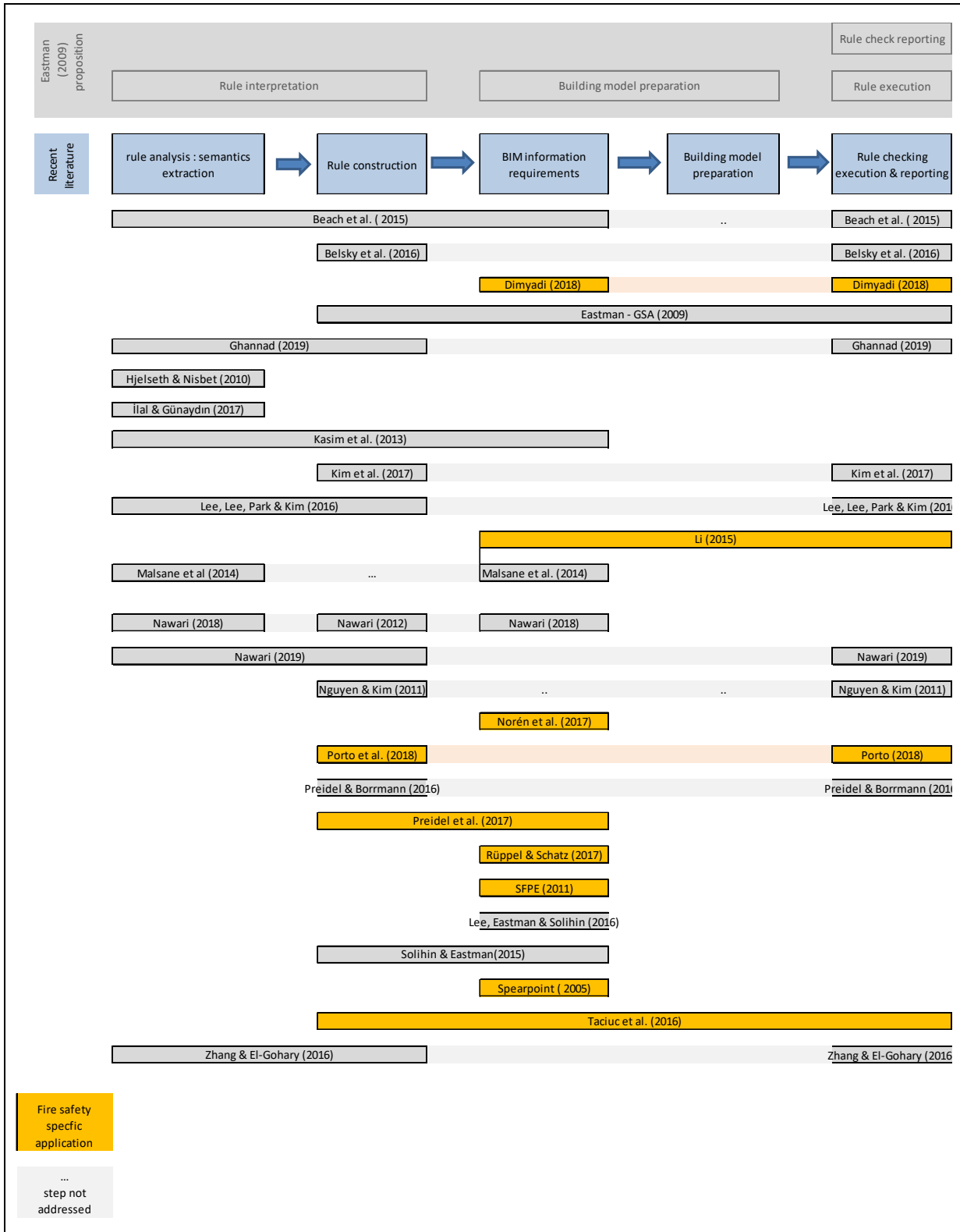


Figure 1.13 Aperçu du sujet couvert par la littérature recensée

CHAPITRE 2

DÉMARCHE DE TRAVAIL ET ORGANISATION DU DOCUMENT

Le présent chapitre a pour but de présenter le cadre qui va permettre de répondre à la problématique, tel qu'elle a été définie dans 1.5. D'abord les objectifs spécifiques seront décrits pour ensuite présenter la méthodologie qui permettra d'atteindre ces objectifs. Enfin le protocole expérimental pour la preuve du concept sera présenté afin de démontrer quel type d'information a été utilisé pour produire les résultats finaux.

2.1 Objectifs spécifiques

L'objectif du travail est de proposer des mesures pour améliorer l'intégration des concepts de la sécurité incendie dans le processus de conception des bâtiments multi-étages en bois par le biais de l'approche BIM. En particulier, le domaine de la vérification automatisée des normes basée sur le BIM a été étudié. Il a donc été conclu qu'il est nécessaire de s'intéresser davantage à la méthode au complet. Ainsi, l'objectif général est de proposer dans le CHAPITRE 3 une méthode globale et cohérente, spécifiquement adaptée à la sécurité incendie, de vérification automatisée des normes et basée sur le BIM. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- identifier l'outil le plus adapté dans le contexte des prescriptions canadiennes concernant la sécurité incendie (Article de conférence en ANNEXE II);
- proposer une méthode cohérente complète couvrant le processus de vérification des règles dans son intégralité, et l'évaluer dans la pratique (CHAPITRE 3);
- émettre des recommandations concernant la préparation du modèle BIM pour une meilleure intégration de la sécurité incendie (cf. 4.1).

2.2 Méthodologie et approche de recherche

L'approche de recherche pour construire la méthode est un processus itératif (Figure 2.1) et s'inscrit dans le paradigme de la science de la conception (*Design science research*). L'artefact associé issu de ce travail de recherche est une méthode. Hevner et al. (2004) affirment qu'un artefact est le produit d'un processus de conception et que celui-ci est basé sur la définition de boucle de construction et d'évaluation. En effet, nous évaluerons l'artefact lors de la construction de la méthodologie en examinant l'utilité du processus tout au long de la construction. Chaque règle construite et testée aura alors un impact sur la façon dont nous abordons la règle suivante.

Premièrement, il s'agit d'étudier les concepts et les défis de la sécurité incendie afin de comprendre le contexte de la réglementation. Les réglementations ont été donc analysées en concordance avec l'approche orientée objet BIM. Les éléments critiques de la réglementation en sécurité incendie ont donc pu être identifiés pour les aborder dans le BIM et déterminer de manière préliminaire quels aspects sont moins adaptés à l'approche BIM. Ensuite, les outils disponibles ont été cartographiés et comparés. Cela inclut non seulement les logiciels de vérification du code, mais également les logiciels utilisés par les ingénieurs en sécurité incendie lors du processus de conception afin de comparer les forces et les faiblesses de chaque approche. Les résultats de cette étude comparative sont résumés dans l'article de conférence présenté en ANNEXE II.

En parallèle, un premier test pratique de la traduction de la réglementation en règles lisibles par ordinateur est exécuté sur un modèle de bâtiment fictif afin d'examiner les besoins du point de vue pratique de la modélisation BIM. Des règles traitant de différents aspects de la protection passive contre l'incendie ont donc été sélectionnées afin d'identifier concrètement les types d'information nécessaires dans le modèle. Pries-Heje, Baskerville, et Venable (2008) préconisent l'évaluation ex ante, car elle peut aider à évaluer si un artefact informatique sera bénéfique une fois pleinement développé. Le but de cette étape est alors de tester et de comparer deux outils différents sur un ensemble de règles restreintes de deux des

textes de réglementation concernés utilisés dans la preuve de concept. Deux solutions disponibles sont testées dans ce cadre : *Solibri Model Checker* (SMC) et *Dynamo* pour la programmation visuelle. SMC a été choisi pour son utilisation étendue dans le contrôle de la qualité des modèles de bâtiments et pour son développement avancé d'interface utilisateur et des règles de vérification d'accessibilité pour les occupants (Eastman, 2009). Les deux solutions présentent des avantages et des limites différentes décrites dans la littérature. Cependant, la description des différentes fonctionnalités a été jugée insuffisante pour déterminer uniquement sur la base de la revue de la littérature laquelle des deux solutions possibles devrait être utilisée dans la méthode proposée. Sur cet ensemble de règles choisies, nous avons testé lequel de ces deux outils nous semblait le plus approprié.

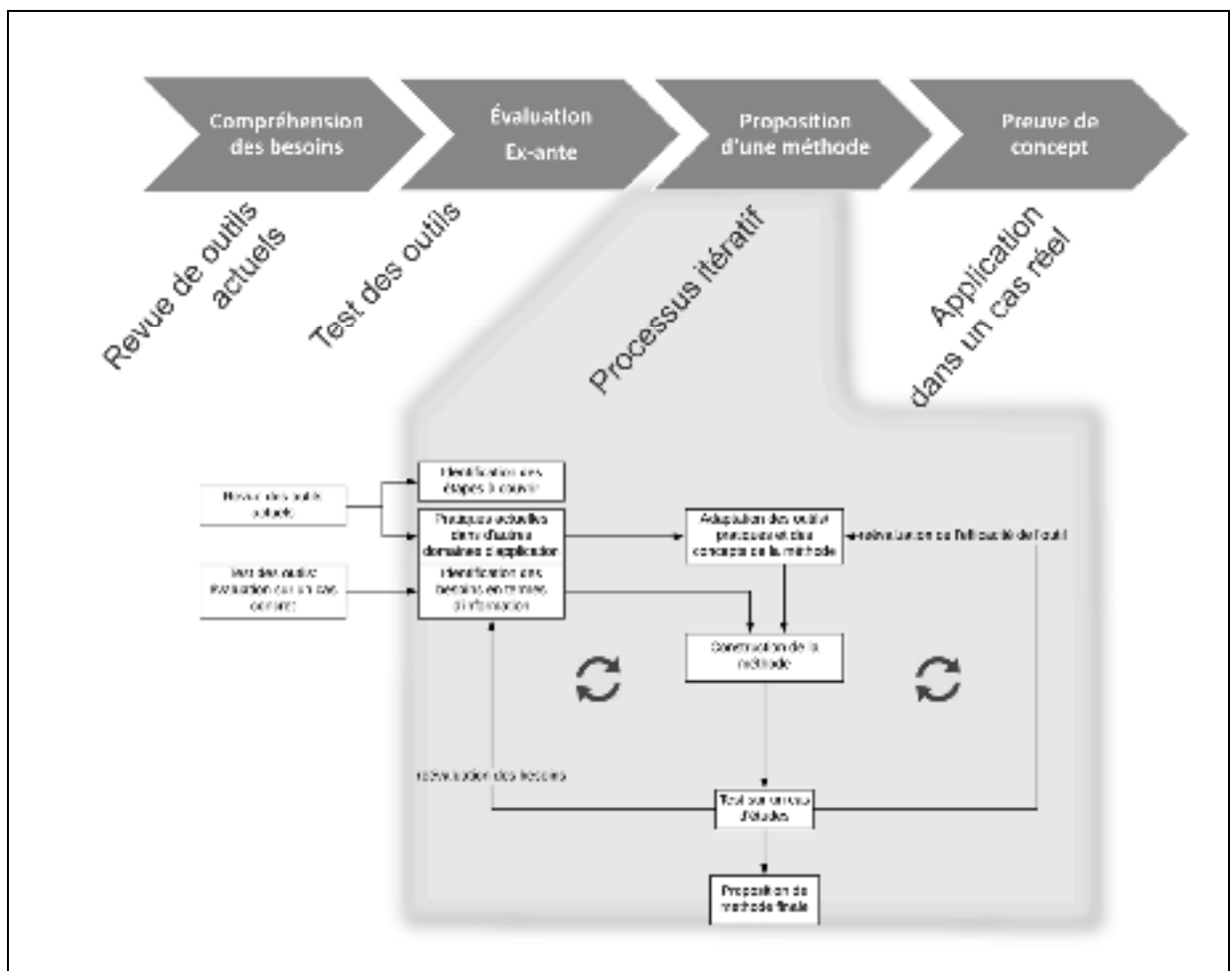


Figure 2.1 Méthodologie de recherche

Les exigences de sécurité incendie que nous devons analyser sont stockées dans la partie B du Code du bâtiment canadien de 2010 (CNBC), ainsi que dans le guide la RBQ Bâtiments en bois massif jusqu'à 12 étages (Veilleux et al., 2015). Nous nous intéressons uniquement aux bâtiments combustibles ayant de 6 à 12 niveaux et nous ne sommes donc autorisés à traiter qu'avec les groupes C et D (Veilleux et al., 2015).

Une fois les besoins définis et le test d'outils effectué, la méthode générale est construite. Les règles développées seront donc d'abord évaluées sur un modèle fictif en se basant sur les prescriptions du CNBC ainsi que sur les principes de la sécurité incendie (BS EN 1995-1-2:2004, 1995; Canadian Wood Council, 1996; Torvi, Kashef, Benichou, & Hadjisophocleous, 2005). Ensuite les règles de vérification construites sont validées sur un modèle BIM d'un projet réel afin de démontrer l'interopérabilité des règles à partir de la méthode utilisée et de prouver que l'application est possible dans plusieurs contextes. Cette méthode d'évaluation est une expérience contrôlée. En effet, nous utilisons des données d'un modèle BIM de projet réel, mais en exécutant les règles dans un environnement artificiel, l'expérience n'ayant effectivement pas d'impact réel sur le projet.

2.3 Choix de logiciel de construction

L'évaluation ex ante a permis d'identifier des défis spécifiques dans le domaine de la protection incendie. Cette première manipulation des données de régulation en parallèle avec les deux outils présélectionnés (SMC et Dynamo) a montré les défis du domaine et les limites associées à chaque outil testé. Il a été conclu que SMC a une interface facile à utiliser et que le logiciel est stable. Cependant, comme l'outil est commercialisé, il restreint la création des nouvelles règles de vérification, permettant uniquement une personnalisation des valeurs cibles, ce qui empêche la possibilité de développement des règles de protection incendie dans le contexte des réglementations canadiennes. Par rapport à cette solution propriétaire, l'outil de programmation visuelle Dynamo a démontré sa capacité à créer des compartiments personnalisés et une possibilité de dérivation avancée des paramètres et une liberté de création des règles de vérification. Il est à noter que cet outil est moins intuitif et peut

présenter des faiblesses de développement logiciel. Pour conclure, il est important d'assurer une totale liberté d'accès aux informations contenues dans les modèles de construction, et c'est pour cela que l'étude se limite à l'approche de programmation visuelle dans la suite.

Une analyse comparative détaillée est proposée dans l'article de conférence présenté en ANNEXE II.

2.4 Application du CNBC

Des clauses prescriptives ont été sélectionnées pour implémentation et une évaluation dans le cadre de la méthode (Tableau 2.1 et Tableau 2.2). Dans le contexte de la construction en bois, on se concentre sur les règles qui traitent du confinement du feu et le choix des matériaux pour la propagation de la flamme. Les règles étudiées en détail définissent les concepts de la liste suivante :

- compartimentation des suites et des réserves verticales,
- vérification des degrés de résistance au feu,
- continuité des séparations coupe-feu,
- protection des ouvertures dans les séparations coupe-feu,
- indice de propagation de la flamme.

Tableau 2.1 Clauses sélectionnées de CNBC
Tiré de CNRC (2010)

N°	Contenu de la clause
3.1.8.3. Continuité des séparations coupe-feu	1. Sous réserve du paragraphe 3.6.4.2. 2), si un vide technique horizontal ou un vide de construction est situé au-dessus d'une séparation coupe-feu verticale exigée, y compris une paroi de gaine verticale ou de cage d'escalier, cette séparation doit comporter un prolongement équivalent dans le vide en question.
	2. La séparation coupe-feu exigée au paragraphe 1) doit comporter un joint étanche à la fumée à la jonction : a) d'un plancher; b) d'une dalle de toit; ou c) d'un platelage de toit.
	3. Sous réserve de la sous-section 3.6.3. pour une gaine traversant un toit, une gaine, y compris les parois d'une issue, traversant une séparation coupe-feu doit : a) se prolonger dans toute la traversée des vides techniques horizontaux ou des vides de construction; et b) comporter un joint étanche à la fumée à la jonction : - d'un plancher; - d'une dalle de toit; ou - d'un platelage de toit.
	4. La continuité d'une séparation coupe-feu doit être maintenue à sa jonction avec une autre séparation coupe-feu, un plancher, un plafond, un toit ou un mur extérieur (voir l'annexe A).
3.1.8.6. Dimensions maximales d'une ouverture	2. Une ouverture dans une séparation coupe-feu intérieure qui doit être munie d'un dispositif d'obturation doit avoir une surface d'au plus 22 m ² et n'avoir aucune dimension supérieure à 6 m si les compartiments résistant au feu situés de part et d'autre de cette séparation sont protégés par gicleurs.

Tableau 2.1 Clauses sélectionnées de CNBC (suite)
Tiré de CNRC (2010)

N°	Contenu de la clause
3.1.13.2. Indice de propagation de la flamme	1. Sauf indication contraire dans la présente sous-section, l'indice de propagation de la flamme des revêtements intérieurs de finition des murs et plafonds, y compris les vitrages et lanterneaux, ne doit pas dépasser 150 et doit être conforme au tableau 3.1.13.2.
	2. Sous réserve du paragraphe 3), il n'est pas obligatoire que les autres portes que celles des usages du groupe A, division 1, soient conformes au paragraphe 1), pourvu qu'elles aient un indice de propagation de la flamme d'au plus 200 (voir l'annexe A).
	3. Il n'est pas obligatoire que les portes à l'intérieur des logements soient conformes aux paragraphes 1) et 2).

Tableau 2.2 Clauses sélectionnées du Guide RBQ
Tiré de Veilleux et al., (2015)

n°	Contenu de la clause
1.3.1.	Les planchers doivent former une séparation coupe-feu ayant un degré de résistance au feu d'au moins 2 heures.
1.3.4.	Les murs, les poteaux, les arcs porteurs ainsi que les assemblages et les attaches doivent avoir un degré de résistance au feu d'au moins 2 heures.
1.3.7.	Les séparations coupe-feu entre les suites, et entre un corridor commun et une suite doivent avoir un degré de résistance au feu d'au moins 1 heure.
1.5.2.	Les escaliers d'issue doivent être isolés les uns des autres et du reste du bâtiment par une séparation coupe-feu étanche à la fumée ayant un degré de résistance au feu au moins égal à celui qui est exigé pour le plancher qu'ils traversent.
1.5.4.	Tous les vides techniques verticaux, dont les chutes à déchets, doivent être isolés du reste du bâtiment par une séparation coupe-feu ayant un degré de résistance au feu d'au moins 2 heures et être de construction incombustible.

2.5 Présentation des articles

Les étapes de compréhension des outils actuels et de l'évaluation des outils fait l'objet d'un article de conférence intitulé *BIM-based code compliance checking for fire safety in timber buildings : a comparison of existing tools* (ANNEXE II). Le travail a montré qu'il existe une lacune dans l'étude de l'application aux différents domaines des solutions existantes en utilisant comme exemple l'applicabilité à la protection passive en sécurité incendie. Ce travail a donc permis de sélectionner l'approche et l'outil qui semblent les mieux adaptés à la vérification de conformité du modèle. Dans l'article *Fire Safety in tall timber building : A BIM-based automated code-checking approach* (CHAPITRE 3) est donc présentée la méthode qui a été construite en l'appliquant au contexte québécois de sécurité incendie dans la construction en bois multi-étages jusqu'à 12 étages. Cette méthode comporte plusieurs étapes en partant des textes de réglementation jusqu'à obtention de résultats sur la conformité ou non des éléments donnés. La méthode est ensuite testée sur une série des clauses réglementaires sélectionnées et les règles implémentées sont testées sur un modèle du bâtiment d'un projet réel afin de démontrer l'applicabilité de la proposition ainsi que ses limites.

Les concepts étudiés dans l'article font référence à des scripts de programmation visuelle ainsi que des scripts de Python pour créer des nœuds personnalisés nécessaires dans le cadre de cette recherche. En évoquant la nécessité de classifier les espaces en trois catégories distinctes afin d'y associer les éléments (cf. 3.3.3.2), les nœuds ont été développés dans ce contexte (cf. ANNEXE IV, ANNEXE V et ANNEXE VI). Ensuite, étant donné la flexibilité de la construction des règles en programmation visuelle, uniquement leur structure d'organisation est représentée. Ainsi, l'ANNEXE VII et l'ANNEXE VIII illustrent les règles de vérification respectivement pour le degré de résistance au feu et pour l'indice de propagation de la flamme. Les résultats associés à l'application du CNBC (Tableau 2.1 et Tableau 2.2) sont résumés dans l'article du CHAPITRE 3 et dans le CHAPITRE 4, et les recommandations qui découlent de l'implémentation sont présentées en fin du présent travail.

CHAPITRE 3

FIRE SAFETY IN TALL TIMBER BUILDINGS: A BIM-BASED AUTOMATED CODE-CHECKING APPROACH

Kristina Kincelova ^{a,b}, Conrad Boton ^a, Pierre Blanchet ^b and Christian Dagenais ^{b,c}

^a Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b NSERC Industrial Research Chair on Ecoresponsible Wood Construction, Department of
Wood and Forest Sciences, Université Laval, 2425, rue de la Terrasse, Quebec City, Quebec,
Canada G1V 0A6

^c FPInnovations, 1055, rue du P.E.P.S., Quebec City, Quebec, Canada G1V 4C7

Article soumis pour publication dans « Buildings », juillet 2019

Abstract: The fire safety regulations impose very strict requirements on building design, especially for buildings built with combustible materials. It is believed that it is possible to manage these regulations with the building information modeling (BIMForum) approach. A new BIM-based domain is emerging, the automated code checking, with its growing number of dedicated research approaches. However, these works are not addressing the problem in its entirety, and proposing only partial solutions. The applicability to fire safety in Canadian context is therefore studied by constituting and executing a complete method from the regulations text through code-checking construction to result analysis. A design science approach is used to construct the code-checking method with a detailed analysis of the National Building Code of Canada (NBCC) in order to obtain required information. The method starts by retrieving information from the regulation text and leading to a compliance check of an adapted building model. Then, the method is tested on a set of fire safety regulations and validated on a building model from a real project. The selected fire safety rules set a solid base for further development of checking rules for the field of fire safety. This study shows that the main challenges for the rule checking are the modeling standards and the elements' required levels of detail. The implementation of the method has been

successful for geometrical as well as non-geometrical requirements, although further work is needed for more advanced geometrical studies, such as sprinkler or fire dampers positioning.

Keywords: BIM; fire safety; compliance checking; building code; visual programming

3.1 Introduction

To encourage the interest in Canada for mid-rise and high-rise timber buildings, different organisms and initiatives take place at federal and provincial levels, such as, among others, the Wood First Act in British Columbia (British Columbia Laws, 2009) and Wood Charter in Quebec (Ministry of Forests, 2017). The Wood First Act requires, since 2009, to use wood as a primary material in all provincially-funded buildings. Likewise, the Wood Charter is an initiative of the Quebec government containing measures, which aim to encourage the use of wood in all aspects of construction. The prescriptive provisions of the Canadian and provincial building codes however continues to limit this type of construction to buildings of no more than six storeys in height, with the exception of the province of Quebec where up to 12-storeys mass timber construction is allowed. (Veilleux et al., 2015). Tall buildings need to provide very strict fire safety conditions (Östman et al., 2010), it is therefore necessary to prove efficient tools for designing and verifying compliance of the fire safety regulations. With the growing building information modeling (BIM) integration in the design practices (BIMForum), emerging BIM-based approaches to regulation compliance checking can be seen. There are tools and approaches that specialize in automated compliance checking of different regulations (Beach et al., 2015; Johannes Dimyadi & Amor, 2013a; Eastman et al., 2009). To conclude, this study offer a new view on the BIM requirements for automated rule checking and in the context of fire protection, showing especially that detailed rule check ask for very precise information input, which is not today considered as standard for everyone.

In parallel, several reports show that the present integration of fire protection in BIM is limited and that there is a demand for more inclusion of these challenges (Norén et al., 2017; SFPE, 2011). Even when the fire safety is represented in BIM, it is often reduced to clash

detection of the sprinkler systems or use of the general geometry for fire, smoke or evacuation simulations (Johannes Dimyadi, Amor, & Spearpoint, 2016; Johannes Dimyadi et al., 2008; Spearpoint, 2006). This however includes the discipline only when the design is finished and therefore the fire protection requirements are considered late in the process. It is believed that this can be enhanced by facilitating the verification of fire protection elements during the design phase. A global method for code-compliance checking, that is adapted specifically to the fire protection and the reality of BIM integration in the sector of timber building in Quebec, is described herein. It is noted that it can easily be adapted to other regulatory environment, such as other provinces or countries. This study is solely focusing at the architectural and structural interfaces of the fire concepts, but recognizes the existence of other interfaces (HVAC, plumbing, electrical engineering) (Lataille, 2002), which need to be addressed as well in the future. The goal of this study is to present a coherent method that covers a complete process of conformity assessment, addressing in particular the challenges of information transfer and integrating the data specific to fire protection in the building model. The related works are first described and contextualized to suit the applicable regulatory environment of the present study. Based on these findings, a complete method is constructed and the different steps are described while fully considering the fire safety requirements. Finally, the method is validated against a set of rules on a building model of an architecture design for a residential mass timber building project in Montreal (Quebec, Canada).

3.1.1 Main fire safety challenges

3.1.1.1 General context

The main goal of fire safety engineering is to limit the probability mainly of death and injury, but also of property damage (Buchanan & Abu, 2001). Several domains are impacted in the fire safety design, including electricity, mechanics, architecture and structure. More specifically, one can distinguish two types of fire safety systems: active and passive controls (Buchanan & Abu, 2001). The prevention of fire ignition and fire spread is a part of the passive protection and is important for timber buildings. This can be controlled through

choice of materials, architectural decisions, but also through the fire resistance of fire separations or façade flame spread control (Östman, Brandon, & Frantzich, 2017). Once there is an object ignited, it is essential to limit its spread in order to be able to quickly control and put out the fire and thus limit the damages.

The passive protection system is an essential element of the design and highlights the necessary cooperation of the various domains during the design phase. For example, the interference between firewalls and technical conduits can create an unplanned fire path. In addition, for vertical construction, the main risk is represented by the vertical ducts (Buchanan & Abu, 2001; Canadian Wood Council, 1996) (lifts, ventilation, and stairs) that cross several floors and therefore can create a space for rapid fire spread between different floors. In the light of these works, it can be concluded that if the construction material is a combustible material (e.g. wood), it is necessary to give more attention to the aspect of passive protection in the fire safety and the following work will be therefore restricted to the study of passive systems.

Tall buildings need to assure very strict fire safety conditions (Östman et al., 2010). That is why it is necessary to prove efficient tools for designing and verifying compliance to the fire safety regulations. The nature of these regulations are presented next in attempt to understand what kind of tool is needed to answer the compliance checking requirements.

3.1.1.2 Fire safety regulation context of the province of Quebec's territory

In Canada, compliance to the NBCC can be achieved by complying with the acceptable (prescriptive) provisions found in Division B, or through alternative (performance-based) solutions that will achieve at least the minimum level of performance required by Division B, as there are objectives and functional statements attributed to the acceptable solutions. Performance-based design is used in other code areas, such as structural or acoustic design, however Canadian fire protection design regulations that are effective today are still very prescriptive-oriented. In the prescriptive design, strict definition of dimensions, construction

methods, and other features (Hurley et al., 2015) are to be respected. Even though more performance-based elements are being added to the building code (Canadian Wood Council, 1996; Dagenais & Desjardins, 2012), prescriptive requirements remain more prevalent. This verification is still done manually and thus prone to errors. However, the BIM approach takes more prominent place in the design process and can contribute to automation of the compliance checking practice.

3.1.2 BIM and automated code compliance checking

The BIM approach consists at using a multidisciplinary object-oriented tridimensional (3D) model of the constructed facility to document its design and the model can also be used to simulate different aspects of its construction or its operation (Boton, Forgues, & Halin, 2018). This includes a more multidisciplinary approach to the design phase of the project. It is natural today to include domains such as architecture, structure or HVAC. However, several domains are less included in the transition toward object-based modeling. Several reports have the same opinion on the limited integration of fire safety challenges in the BIM methodology throughout the construction industry in general (Norén et al., 2017; Ruppel & Schatz, 2017; SFPE, 2011).

As of today, the main solutions commercially available for BIM-based automated checking are three software: Solibri Model Checker (SMC) (Eastman et al., 2009; Li, 2015; Taciuc et al., 2016), Fornax (Solihin, Shaikh, Rong, & Lam, 2004) and EDM Jotne (Ding, Drogemuller, Rosenman, Marchant, & Gero, 2006). In reality, the current commercially available solutions seem unable to cover these essential elements adequately (Kincelova, Botton, Blanchet, & Dagenais, (in press)), which has conducted a more detailed demonstration. The rules in SMC do not allow to freely manipulate data to generate new derived properties: Solihin, et al. (Solihin, Dimyadi, Lee, Eastman, & Amor, 2017; Solihin & Eastman, 2015) defined a derived property as an information in the building model that is not presented explicitly (e.g. volume), but can be obtained if necessary data (e.g. length, depth and height) are present in the building model. The possibility of creating new derived

properties is an essential requirement for a functional and complete rule-checking tool (Eastman et al., 2009; Kim et al., 2017). To address the issue of fire safety regulation automated checking, it is necessary to be entirely free to manipulate the data and to have absolute transparency in terms construction of rules, because there is a lot of implicit information. More specifically, several properties that must be checked are non-geometrical, but related to specific spaces or selected objects, such as fire resistance rating, flame spread rating, combustibility, etc. This explains why the current commercially available solutions are often criticized (Greenwood, Lockley, Malsane, & Matthews, 2010; Preidel & Borrmann, 2015) for their lack of flexibility and *black-box* aspect. Therefore, recent research works started to approach this domain from different points of view, proposing new avenues to address the issue.

3.1.3 Recent innovations in research

In 2009, Eastman, et al. (2009) examined five applications of the existing commercial tools to present a state of the art at the time in the automated rule-checking domain. In order to do so, he defined four stages of rule checking process, using detailed functional criteria. The process is comprised of rule interpretation, building model preparation, rule execution and rule check reporting. This framework has set a solid foundation for the following research works. Since Eastman, et al., several works have been carried out to address one or more of these steps.

3.1.3.1 Rule analysis

Rule analysis can be defined as a study of ways to extract semantics from written statements in building codes and structure them in object-oriented format. The data remains represented in human language, the clauses have then to be classified first. Nawari (2008) proposed a definition of four different categories of clauses: *Provisory* class concerns clauses where it is possible to directly transform the text into set of rules based on objects is possible. *Dependent* clauses define the dependent regulations on one or more propositions and define specific conditions. These two categories are similarly defined as declaration clauses by

Malsane, et al. (2015). Finally, *Ambiguous* provisions are subjective, and can be automated only with special approaches such as artificial intelligence (AI) or require a rewrite. In comparison, Malsane, et al. defined as informative the clauses that contain information only partially prone to transformation and requiring interpretation of a human being. They should not be excluded from further analysis, but rather put aside for an alternative processing (N. Nawari, 2019; N. O. Nawari, 2018).

After filtering further usable clauses, the following information is extracted by Nawari (N. O. Nawari, 2018): type of information, necessary information, obligatory/optional information, data type and units. Similarly, Malsane, et al. (2015) addressed the issue with extracting for each clause separately the object, associated attributes to each object and the format of each attribute. A different manual approach is presented in the KBIMCode (Kim et al., 2017) for regulation analysis compliance to the Korean Building Act. The work takes an original phrase and breaks down the meaning to elementary sentences. These elementary sentences are comprised of essential data: subject, verb and object (H. Lee et al., 2016).

Finally, there is the mark-up approach to extract information from the regulation texts. The developed language RASE (Requirement-Applicability- Selection-Exception) project (Hjelseth & Nisbet, 2010; İlal & Günaydın, 2017) is one of the most cited methods in BIM-based rule automated analysis. Developed by company AEC3, the RASE methodology was demonstrated in particular in the United Kingdom context for the UK InnovateUK RegBIM, where environmental standards and certifications were assessed (Beach et al., 2015; buildingSMART, 2017b). The research proposes to characterize each check by a set of only four distinctive constructs (R-A-S-E). To quantify the constructs, they are then associated with following attributes (one of each): topic, property (from a restricted dictionary), comparator and target value. There also exists a RuleML legal open standard (Ghannad et al., 2019). Even though this language is supposed to be readable by human as well as machines, it is necessary to transform the mark-ups into computable rules by a single recursive algorithm (Hjelseth & Nisbet, 2010) in order to render the rules computable. Thus, this transformation and the understanding of the process require an extensive IT knowledge, in

terms of coding languages, interoperability and information transfer. Furthermore, the RASE methodology merely captures the target values and explicit data and does not consider the interpretation of the rule meaning and its possible ambiguities or subjectivities (Eastman et al., 2009; Malsane et al., 2015; Solihin & Eastman, 2015). Hence, it must be considered that according to Solihin & Eastman (2015) in order to make a complete and meaningful translation of a regulation rule, it can only be done manually, as the computer will not be able to substitute the domain's expertise knowledge.

3.1.3.2 Rule construction

Literature identified in this step presents different methods of rule construction. They are based on extracted semantics.

Nawari (2018) first represented the requirements in Model View Definition (MVD) form that were then transformed into the ifcXML language and then adapted to the application developed by the author (N. O. Nawari, 2012). The framework is based on several information technologies, including ifcXML and LINQ, therefore this method requires certain IT skills that are most likely not common for a construction professional (Beach et al., 2015; Solihin & Eastman, 2015). Similar challenge of IT expertise is encountered in the approach for sustainability verification (Beach et al., 2015) and in early design assessment (Ghannad et al., 2019). The logic RASE tags needed to be converted into a computable format by SWRL (Semantic Web Rule Language), and Ghannad, et al. (2019) used visual programming through Marionette (Vectorworks) to transfer rules in the XML format, that was previously formalized by the mark-up language. Hard-coded code-checking tools were also developed, in form of a plug-in to a BIM modeling software such as Revit (Nguyen & Kim, 2011; Porto et al.) or as a stand-alone code checker (İlal & Günaydın, 2017; Nguyen & Kim, 2011). However, the hard-coded construction is not viable in the context of ever changing standards in the building industry context.

Then, the visual programming for rule construction was explored. In the KBIM Project (Kim et al., 2017; H. Lee et al., 2016), the configured elementary sentences were translated into an arithmetic logic unit (Maluk, Woodrow, & Torero, 2017) and later completed with a method developing a visual language for this context by Kim, et al. (2017). Similarly, Preidel showed that a formal code representation language is capable of building code compliance checking (Preidel & Borrmann, 2016). The related work focused on geometric and non-geometrics requirements, as well as the accessibility in terms of comprehension and visualization for non-experts in programming. The visual programming therefore seems to be a promising tool for rule construction in compliance checking as it uses association of basic methods to construct different rules. This encourages reuse of rule structure, which is promoted by Solihin (2015) as a key principle to reduce the costs of implementation. Both Preidel and Kim defined a new rule construction and checking tool that seem to answer the necessary requirements of IT accessibility and possibility of new rulesets construction. However, they did not address the link between the rule-checking tool and the model information requirements.

3.1.3.3 Mapping of information requirements and building model preparation

The extracted semantics in rule analysis should be transformed and organized in an object-oriented format. Compared to the efforts of standard translation and rule construction, the step of BIM information requirements and building model preparation are addressed by few authors. The authors remind us on many occasions that maintaining strong links between textual documents and the rules (Beach et al., 2015) is needed, but the links between the textual documents and the building model is somewhat neglected even if it is equally important.

The work of Malsane, et al. (2015) being the goal to present a complete IFC format for compliance rule checking, a proposition of a completed IFC extended format was obtained. It is also possible to use an IFC exchange software (e.g. SimpleBIM) (Taciuc et al., 2016), where the author created a template for fire safety requirements, accordingly to assure an

accurate and reliable editing of the necessary information. However, this tool can only represent explicit objects. The data exchange requirements can also be stored in the MVD format (Y.-C. Lee et al., 2016; N. O. Nawari, 2018). However, the fire protection required attributes are often derived and therefore the IFC representation or its extension does not seem to be optimal. As opposed to the rigid structure of the IFC format with the MVDs, there is the model element tables which enables a more comprehensive communication between actors, even though its precision is lesser (BIMForum).

Then, Beach (2015) proposed a construction of different ontologies to separate different types of information. The semantics are mapped from the regulation ontology defined by the author into to the data format ontology. Beach addressed briefly the concept of derived information, which is more specifically formalized by Solihin & Eastman (2015). They proposed a rule classification by nature and complexity of processing instead of classification based on their expertise domain: Information directly available in the model, derived attribute values, extended data structures or performance-based data. The goal is to keep the manual input of new properties to minimum. This need for derived data seems to lack in the approach by VPL and LegalRuleML, as the defined rule parameters (e.g. geometry, attributes, etc.) are addressed directly (Ghannad et al., 2019). The rule parameters remain general as Ghannad, et al.'s (2019) study was intended for use in general early design assessment.

In the context of the present research, the fire safety specific information requirements are needed. Some of the works (Norén et al., 2017; SFPE, 2011) are only providing general recommendations for fire safety BIM modelling, but there is lack of consistency in the inventory of building information requirements. This was addressed in the context of performance-based design (J. Dimyadi et al., 2018; Spearpoint, 2005), where input data for fire simulation needs were identified and then associated with the IFC format. Similar effort is therefore expected with adaptation for the code compliance checking approach.

3.1.3.4 Realization of the rule checking

The execution of rules on the formalized building model results in a report. This report can be presented in textual or graphical form and the content of information depends on the needs and rule implementation. The final phase of the presented methods is the rule execution and reporting. Two possible ways of reporting is defined by Eastman (2009): graphical reporting and referencing to the source building code. The graphical reporting is more developed in the commercially available solutions (SMC).

The research works are mainly focusing on presenting the results of their example of applications, rather than the form of the reporting. SMC was applied to diverse regulations in the following works: Danish regulation BR10 9 (fire safety) (Taciuc et al., 2016), Building Code of China (Fire safety regulation) (Li, 2015) and General Services Administration (GSA), U.S. Courts accessibility: (Eastman, 2009). Then, case studies of the different research approaches have also shown application on some elements of the following regulations: BREEAM Certification: (Beach et al., 2015), Korean Building Act (Kim et al., 2017), International Building Code (IBC) 2009 (Nguyen & Kim, 2011) and German standard (Preidel & Borrmann, 2015).

These applications show merely simple examples of their applications and do not prove that their approach could be applied in the Canadian context, furthermore the examples are very isolated and do not give as a more general point of view, mainly in terms of potential to global application to a certain building code. The most advanced study in this regard is the KBIMCode project (H. Lee et al., 2016).

3.1.4 Summary

Based on literature review, it is now possible to establish a global process that comprises five different steps: 1) rule analysis, 2) rule construction, 3) BIM information requirements, 4) building model preparation, 5) rule checking execution and reporting. These individual research works are not put in context to form a complete code checking process, very rarely

addressing the challenge of information transfer from one step to another and, more importantly, that is adapted to the complexity of the fire safety design requirements (third and fourth step). It must be defined what are the information that need to be provided in a building model for a successful check as well as the method to extract this information from the model and make it compatible with the constructed rules.

The goal is to build a more accessible tool that has a transparent functioning and that can be more personalized depending on the used regulation context as well as updated by the user should the regulations change, therefore existing methods requiring extensive programming skills are excluded from further study. In addition, the analysis is done manually due to the proven complexity and language inconsistency of the regulations related to fire safety.

3.2 Materials and Methods

Hevner, et al. (2004) defined four types of artifacts: constructs, models, methods and instantiations. The literature review has shown that there is a certain number of constructs or tools for automated code checking that are focusing on one or more steps of the whole process. That means the proposed method will be explaining steps for the whole outlined process through design science research. The different steps of the project are represented in Figure 3.1. The understanding of the needs is mainly based on the literature review of present solutions for automated code checking that were then put in context of fire safety in tall wood buildings. Then, the identified solutions were sorted and when possible, tested in a preliminary practical comparison. The ex-ante evaluation provides elements like adapted tool selection and related challenges identification. Then, the complete method can be constructed and finally the proposed method is tested and evaluated through a proof of concept, using a real project building model.

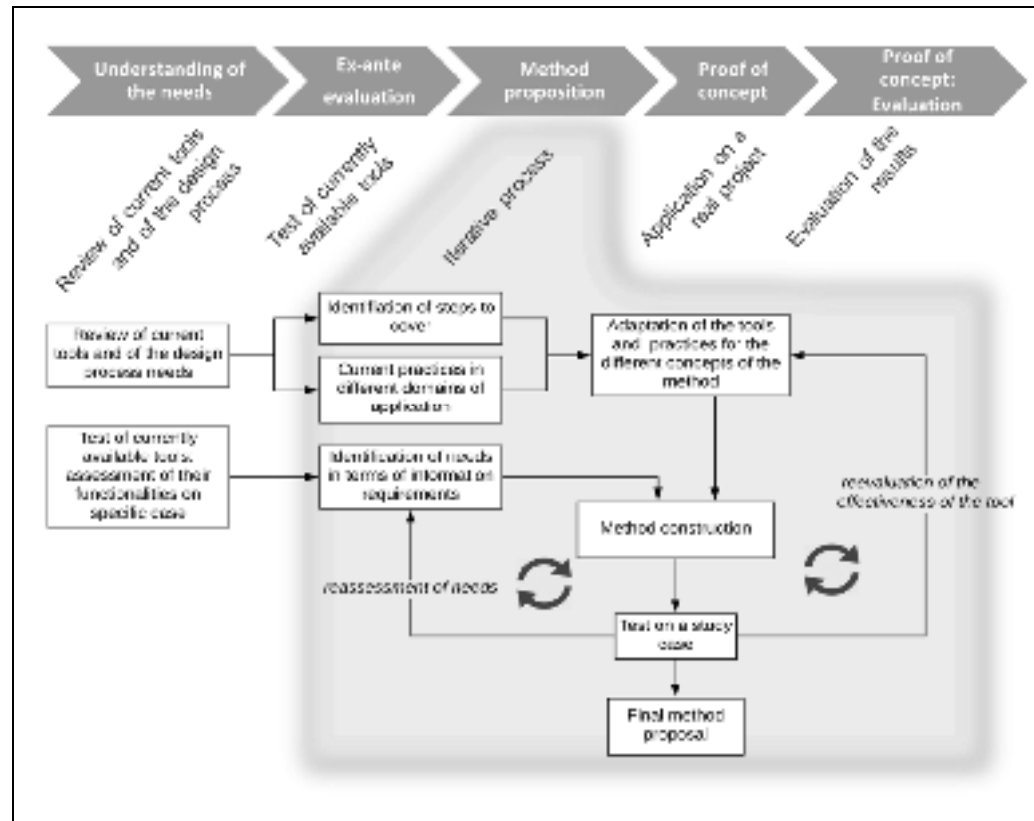


Figure 3.1 Research approach

Furthermore, the compliance-checking tool was constructed in the Revit environment, using Dynamo 1.2.2. The following packages containing certain types of required nodes were used:

- Archi-lab 2018.22
- SteamNodes 1.2.4.
- Clockwork 1.31.2.
- LunchBox for Dynamo 2015.11.28
- Spring nodes 132.2.

Finally, the presented framework is applied to a set of example rules to validate the method. The rules are taken from Division B of the 2010 National Building Code of Canada (NBCC) (CNRC, 2010), as well as in the technical guide for mass timber buildings up to 12 storeys (Veilleux et al., 2015). Based on the step understanding the needs (Figure 3.1), the rules that

were to be translated into computer-readable form have been selected accordingly, all related to the reduced scope of passive fire protection. Clauses have been selected in order to form a solid base for further development of rule verification for the future for the following aspects: Fire-resistance rating, flame spread rating, compartmentation and continuity.

3.2.1 The iterative process of construction of the method

First, fire safety concepts and challenges were studied in order to understand the regulation context. The regulations were analyzed from the object-oriented perspective in relation to the BIM point of view. The critical elements of fire safety regulation could therefore be identified. To support this work, a practical test of the regulation translation into computer-readable rules were executed on an educational building model in order to examine the needs from the design process standpoint. Examples rules addressing different aspects of passive fire protection were selected in order to identify in practice the needs in terms of building information modeling. Then, the available tools were mapped; this includes not only the code checking software, but also the software used by fire safety engineers during the design process in order to compare the forces and the weaknesses of each approach (Kincelova et al., (in press)). The previous work showed that the use of visual programming was needed.

The following explanations enable the reader to start from desired fire safety regulations text to obtain an automatically generated assessment of the BIM model compliance. The authors defined a method artifact as a definition of a process and proposition of a guide for formal problems. Hevner, et al. (2004) stated that an artifact is a product of a design process. The design process is based on the definition of the build-and-evaluate loop (Hevner et al., 2004). The artifact will be therefore evaluated during the construction of the method by examining the usefulness of the process throughout the construction. Each rule that is constructed and tested will have an impact on the way in which the next rule is approached.

3.2.2 Evaluation criteria definition for the proof of concept

According to Hevner, et al. (2004), the criteria for assessing the contribution of an artifact are *representational fidelity* and *implementability*. This means especially that the technology environments must represent real cases. The developed rules will be therefore tested on one or more real case BIM models to show its interoperability and prove that the application is possible. This evaluation method is of Experimental controlled experiment. In the context of the experimental evaluation, the following qualities of the artifact will be evaluated as defined by (Hevner et al., 2004):

- **Completeness:** In the context of the reduced scope, it will be considered how the constructed rules have answered to the challenge of automating human written building code regulations.
- **Consistency:** The use on an independent BIM model will show how the constructed rules can be adapted to different building model construction.
- **Usability:** This criterion concerns the possible implementation of the proposed workflow, as well as its integration to the designing process (e.g. the effort of minimizing the need for manual input)
- **Accuracy:** The accuracy of the constructed rules has to be evaluated by manual verification. Because the results will be presented in form of a list of non-compliant elements, false negatives will be detected easily. However, the false positives are harder to point out, because of the high number of verified elements.

3.3 Results: Method formalization

The literature review approaches the general challenges of code checking in terms of software needs or regulation classification. However, the specific needs of modeling and especially the separate domains have each different requirement. Therefore, application to fire safety in timber construction must be studied. The first practical shows that the method must not be a linear set of steps, but a more iterative approach between rule construction and

the BIM information requirements. It brings up the challenge of representing specific information needed for fire safety code checking. Furthermore, it is shown in the preliminary test that the model has to be prepared in a certain way and that the constructed rules are not simply executed. As opposed to the literature, which almost never raises the question of the building model preparation, the *ex-ante* evaluation showed that the preparation and the standardization of the information is an essential element in code-checking. The method is therefore going to emphasize these two aspects during the whole method presented herein in order to study the complete process.

3.3.1 General overview

This analysis comprises regulation classification and then extraction of semantics for further use. Once the needed data is collected, the rules can be created. This involves using data from the regulation analysis and creating constraints and rules of success that directly relate to specific attributes defined in the second step, all the constraints that apply to different objects in the model are listed here. As opposed to what is insinuated in the literature, the process of defining building model requirements is not linear, but iterative. The extracted information from the regulation text needs to be present in the building model, the link between the two entities must be very well defined, and the flow of information should be secured. A constant iteration between the BIM requirements and rule construction stage is needed in order to construct a tool that will verify rules efficiently and that will not burden the modeler with heavy data input (Solihin & Eastman, 2015). Having constructed rules and knowing the needed information, recommendations can be made on what kind of attributes need to be specified in a model. This will help us to formalize the building model needs.

During the preparation step, how and what information is required in order to make the automated checking possible is defined. As BIM is an object-oriented modelling method, this step is taking the extracted semantics from the regulations and the way the constructed rules are able to retrieve information. An additional weight will also be put on the importance of optimal integration in the present workflow when adding this new information.

The final step includes the actual execution of the method and reporting on the results. The analysis of the conclusions that were automatically generated can be then re-attributed by the BIM coordinator for example. This paper is excluding the question of BIM coordination between different actors, the role of the checking model in clash detection process, as well as the means of communication non-compliant results.

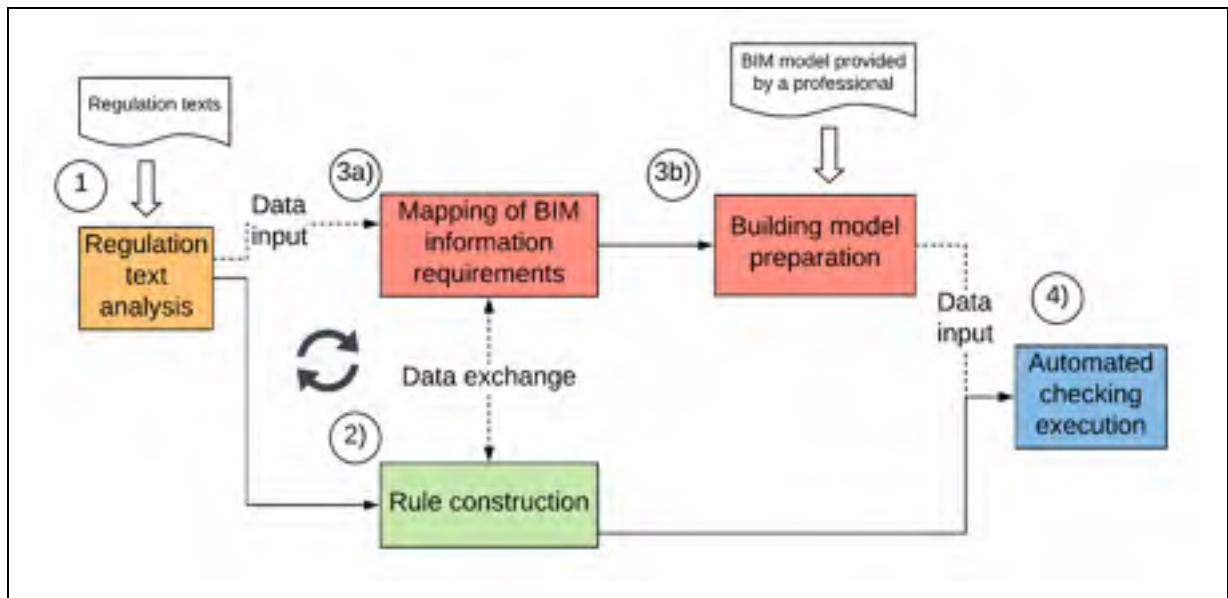


Figure 3.2 General overview of the suggested method

3.3.2 Rule analysis

First, all the necessary concepts and attributes that are of regulation's concern must be extracted. As reported in 2.3.1, several methods exist with different degree of automation. However, the manual approach was chosen in order to maintain complete control over manipulated information, as the fire safety regulations are often formulated implicitly, the terminology use can be inconsistent and the information is very specific and concerns detailed matters. The model of table that is used for the data extraction (Table 1) is adapted from the methods of Nawari (N. O. Nawari, 2018) and Malsane, et al. (Malsane et al., 2015). For that matter, all the clauses are first classified in order to select the categories that can be treated. Given the previous analysis of different clauses classifications, it was decided to classify all the regulation clauses, accordingly to (N. O. Nawari, 2018) to Provisory,

Dependent, Ambiguous and Content categories. Only provisory and dependent clauses are treated completely here. In fact, the content clauses can sometimes be used to specify some object definitions or scope, but do not contain any rule check material and that is why they are not further analyzed in this method. As for the matter of the ambiguous category, it needs more interpretation, such as fuzzy logic (N. O. Nawari, 2018) treatment that cannot be addressed in the scope of this paper. Finally, if the clauses are classified as dependent, it is necessary to state the interdependent sections in the Dependencies column.

Tableau 3.1 Proposed table for extraction of semantics
Adapted from N. O. Nawari (2018) and Malsane et al. (2015)

Section		Classification	Concepts & Attributes	Dependencies
Clause number	Clause text	Provisory/Dependent/ Ambiguous/Content	Extracted concepts and attributes contained in the clause text	Clause numbers that the clause text mentions.

Once the clauses that will be further explored are chosen, it is needed to obtain more information about the attributes that are going to be needed in the model for a successful compliance check. Hence the necessary transformation of the regulation text into an object-oriented format (third column of Table 1), it is noted that these attributes are not presented yet in a BIM-compatible format. The goal is first to list the attributes as they are presented in the code and they will later be adapted to the building-model context. This will feed the BIM information requirements process and it is needed in order to be able to formalize the ontology related to the fire protection requirements in the following steps. Now that all the necessary objects were mapped, rules will be constructed, that will apply constraints to the detected objects and their attributes.

3.3.3 Rule construction

The building regulations contain complex information that cannot be directly represented compared or calculated solely by the generic nodes, which are proposed in the literature.

Even though the general principle of visual programming for rule checking is demonstrated in these works, they lack evaluation in terms of applicability to specific domains. It was seen in the preliminary test, that the fire protection requirements do not expose the same challenges as the accessibility prescriptions, for which the majority of code-checking tools are adapted today. The intent is to give a solid base as a starting point with different methods, which will contribute to creation of rules regarding fire safety in timber construction.

A more detailed study (Kincelova et al., (in press)) allowed to identify specific challenges in fire protection domain and it was concluded that in comparison to the existing proprietary solutions, visual programming allows for complete liberty in accessing the information that is contained in the building models, which is crucial for this type of work. As of today, the visual programming exists in the BIM environment for parametric design in architecture and for code checking approaches in research stage. The main providers are the Grasshopper for Rhino (Abvent) or Dynamo for Revit (Autodesk CFD) or Marionette for Vectorworks (Nemetschek). The choice of software remains the decision of the BIM modeler based on his needs.

3.3.3.1 Rule script implementation

The visual programming consists of creating scripts with the nodes. The scripts are grouped by domain, each representing a rule check, for example a verification of fire-resistance rating for a group of elements. In order for elements to be checked in the same script, the information in the building model must be accessible. The rule construction in the visual programming script is intuitive and accessible for users with limited knowledge of programming, and therefore the structure of the script is not very rigid. In order to construct clear and re-employable scripts however, a general framework is set in Figure 3.3.

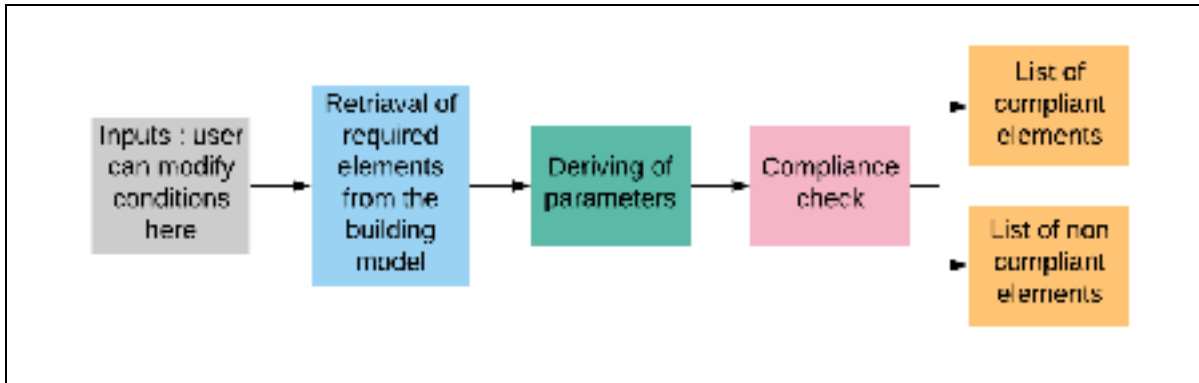


Figure 3.3 Visual programming script structure for any compliance check

First, the script presents a set of inputs, where the user is required to set conditions. It is noted during the practical test that in order for the script to be useful and adaptable in different design firms, it has to be flexible enough to work with different modeling habits. As each firm has its own standards of modeling, the user must be able to modify the entry conditions in the input. For example, one can modify the parameter name, the required value format or value or whether the checked elements are stored in a linked model or in the active model. This is illustrated in Figure 3, where different material names are listed by flame spread rating and can be adapted to the present practices of modeling.

```

materials with flame spread index 25
index25={ "platre", "gyps", "beton", "concrete", "acier", "steel", "aluminium", ">

materials with flame spread index 150
index150={"contreplaque", "plywood", "bois", "wood"}; >
  
```

Figure 3.4 Input example of lists for flame spread rating checking

Once the entry conditions are fixed, it is necessary to extract the necessary data from the model. In Dynamo, nodes exist to retrieve all items for a given category or family type. However, the analysis of fire protection needs showed that construction elements of the same category or of the same type of family may have different constraints depending on their location. The rule checks cannot be directly characterized by a family type (such as done by

SMC for example), so all elements by category are first extracted. A spatial study is carried out in order to classify these elements (walls, ceilings, floors, ventilation ducts, etc.) by compartment or room to which they belong as part of the parameter derivation step. In this step, the Dynamo tool can use the non-geometrical data to derive values, compare a parameter between elements or exploit information related to the object's position. The challenges that need to be addressed when space classifying, are detailed in the next section.

During the compliance check of a given concept, it is necessary to list an exhaustive list of possible figures that are corresponding to a compliance scenario. This was a challenge especially given the formulation of certain requirements in the NBCC. A physical relationship such as continuity, seemingly simple, can be represented in the object-oriented model in several ways (Figure 3.5). It is therefore necessary to retrieve, derive and then check the data for all the possible cases that represent compliance. Once required elements are checked against all the listed possibilities and the element meets one of them, then the element is assumed as compliant.

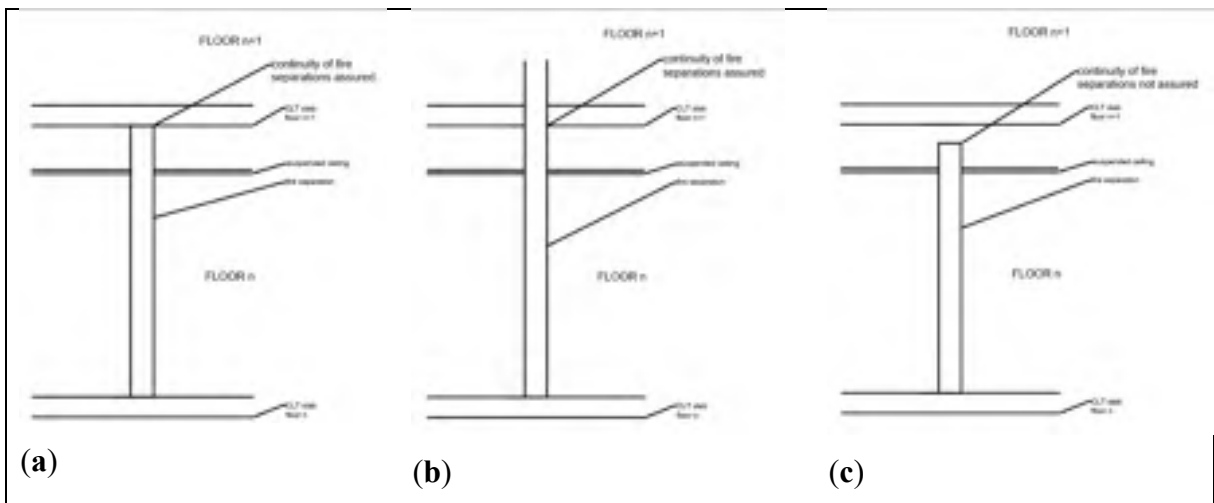


Figure 3.5 Geometry representation of continuity of a vertical fire separation. Vertical separation intersection: (a) with the underface of the slab above (b) with the lateral faces of the slab above (c) no intersection with a fire separation

This leads to a list of true or false statements, which can be associated to the list of surveyed elements. This list is separated into the list of compliant and non-compliant elements. It can be exported in a tabular format and further exploited.

The goal of the rule construction is to minimize hard coded solutions and prioritize already present published nodes created by more experimented contributors. Therefore, it is considered that new nodes composed of Python scripts are to be the last resort and the choice must always be justified. During the proof of concepts, hard coded nodes using Revit API were never needed to retrieve data from the building model. However, the need for compartmentation required specific organization into lists that leads to creation of specific nodes in the steps of Deriving Parameters or Compliance check.

3.3.3.2 Space classification

During the implementation of a script, it is necessary to determine the spaces that elements belong to, as in the field of fire safety the degree of required property and occupants' protection is different depending on the type of space. The fire-resistance rating of the walls will be different depending on the type of the room or area in order to either contain the fire long enough to ensure the evacuation of the rest of the building, or to ensure that the exits are safe during the required time. Function of a room or of a group of rooms (such as a suite) are required and not only the main use category.

After an exhaustive study of the NBCC (CNRC, 2010) in terms of space requirements, it is possible to distinguish three categories of spaces that will be approached differently from technological point (in the construction of rules): (1) *Room*, single entities; (2) *Compartments* is a group of several rooms restricted to a single floor; (3) *Vertical service spaces* that go vertically through several floors.

1. The single room can be retrieved from the model directly, as it is a separate category.
2. The compartments of several rooms are usually not directly represented in the building model. The Area category may be used, it consists of drawing a closed line to create limits of the area representing a compartment. Then a Dynamo script was developed to classify individual rooms in a set of sub-lists by compartment (Figure 3.6).

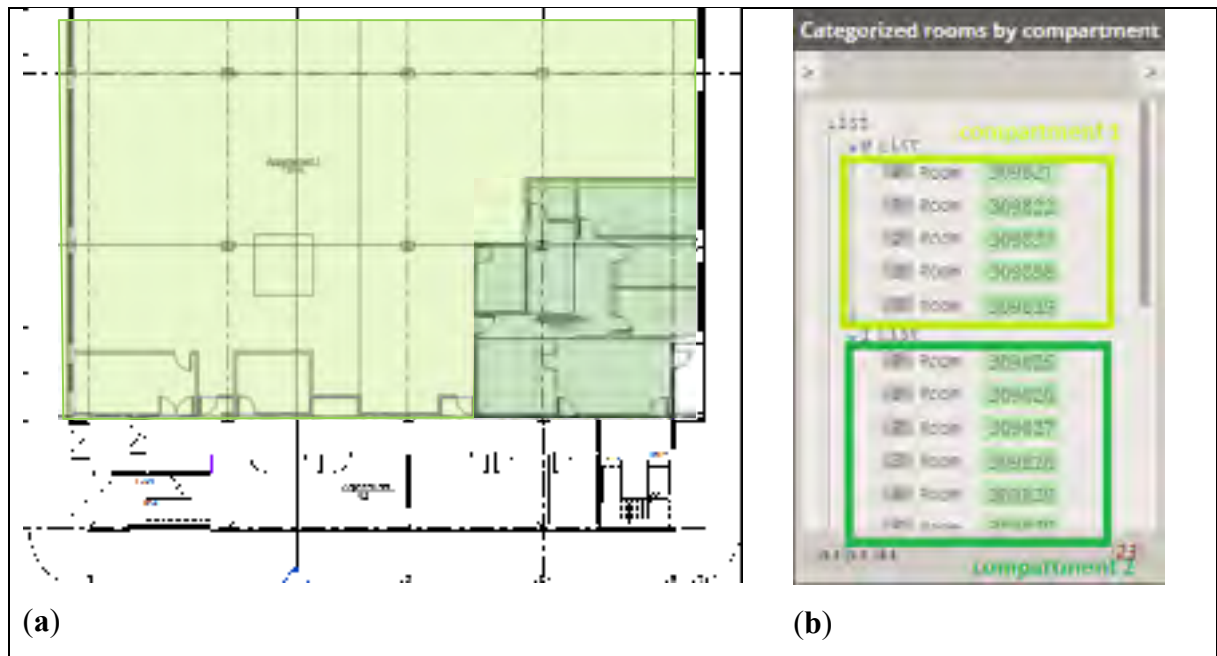


Figure 3.6 Multiple rooms compartment representation: (a) Area boundaries drawn in purple in Revit; (b) Dimensions of the Dynamo list and their structuring

3. The vertical service spaces are the most complex class of space, because for the fire containment study, they should be considered as a unique space that is going through several floors. However, in the building models the staircases are represented as a set of Rooms, one for each floor, it can be the same for garbage chutes or lift service spaces. First, it is necessary to use the same sublist levels as for the case (2) in order to be able to maximize the reusing of the Dynamo scripts (Figure 3.7b). In order to that, the properties of level, name and location point for each object are exploited to obtain a set of sublists that group the objects by corresponding vertical service spaces (Figure 3.7a).

The listing is obtained through analysis of the name parameter and the geometry of each element of category Room. First, the rooms are filtered with name constraint, where an input is a string contained by the vertical service spaces (such as “esc” for “escalier”-staircase). Then, it is necessary to group these individual rooms in the list that represents the whole geometry. This is based on intersection of the vertical lines that go through the center point of the first Room and the geometry of any other room above or below. As it can be seen, this method is only adapted to vertical shafts that keep a similar geometry between levels. For a complicated geometry, where the vertical lines do not intersect the geometry of the different level rooms, a different and more complex approach would have to be developed.

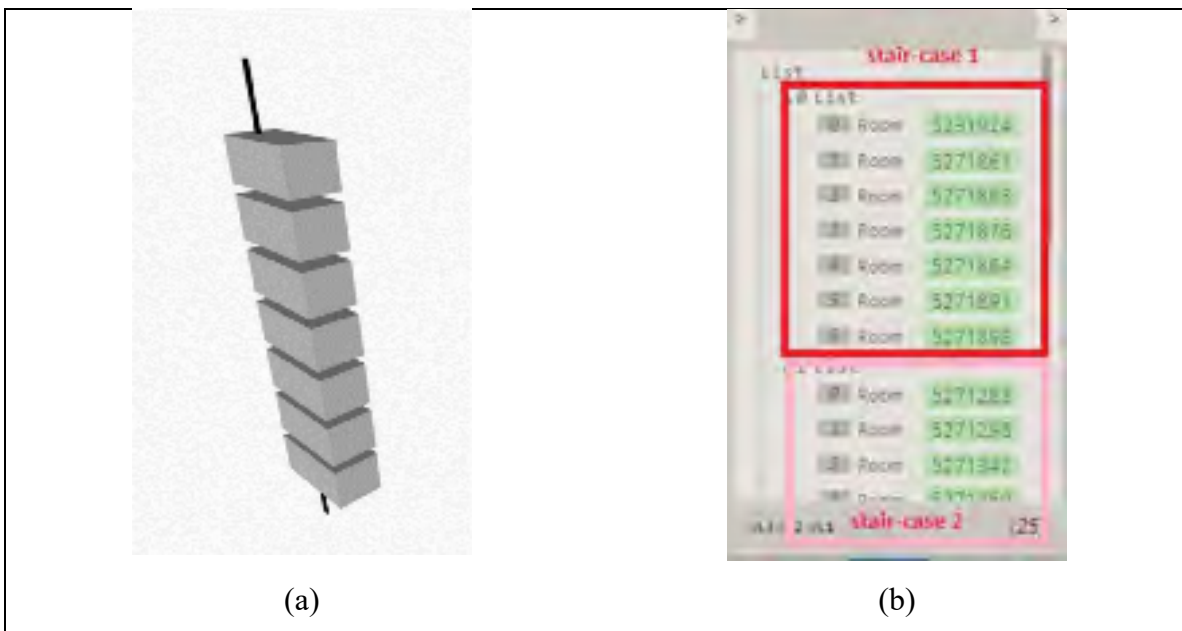


Figure 3.7 Vertical service spaces representation: (a) Intersection between a Room geometry and Room location vertical line; (b) Compartmentation list for vertical service spaces

The presented method of space classification was chosen this way in attempt to require minimum input into the model. Basic parameters are needed, such as category or geometry, to assure that the rules can be recreated in a different context, furthermore it is required by automated checking definition that minimum model manual modification, which is also prone to error, must be done.

During the rule construction, it turned out that the steps for data retrieval and parameter derivation rely heavily on how the information is stored in the model. This shows that it can be important that the modeling standards remain vague in order to allow the modelers freedom in the input of the semantics; however, it makes the data retrieval more difficult. Nevertheless, in order to obtain verification scripts that are as universal as possible, it is still necessary to fix variables and impose the position of certain information and their format. The next sections discuss different aspects of the data needed to prepare the building model.

3.3.4 Mapping of information requirements and building model preparation

Once the information is extracted in 3.3.2, specific data must be saved in order to add it to the building model. Unlike for BIM 5D (cost) or 6D (energy) modelling, where there exist several tools for such preparation, but there is a lack of formalization as to minimum required information for fire safety.

First, exchange requirements must be identified. These are exchanges between the regulation texts and the BIM model schema, as opposed to the usual ER definition, where different actors within a project exchange information (buildingSMART, 2017b; N. O. Nawari, 2018). In this context, buildingSMART (BuildingSMART, 2012) defines an exchange requirement as information that needs to be exchanged between processes. Generally, exchange requirements are general statements, that are described in non-technical terms and they are not specific to an IFC release. Then, the goal is to obtain a complete set of concepts that are needed for BIM modelling. There is a specific buildingSMART methodology proposed on how to obtain a set of Model View definitions (BuildingSMART, 2012). However, in light of the extracted information, it had to be admitted that the IFC schema is not sufficient in terms of the fire protection related needs. Furthermore, it is necessary to represent parameters that are going to be derived from the building model information by the preparatory Visual programming scripts. In order to obtain the most complete information possible, the following work is therefore articulated in form of a Model Attribute Table with specified categories to extract.

3.3.4.1 Parameter management

The compliance check is interrogating attributes of one or several related building model elements. The parameter required for the check can belong to one of four different cases:

- **Automatic parameter:** the element and its required attributes are present in the building model. The information is filled in by the program when the element is drawn. (e.g. wall geometry)
- **Built-in parameter:** The built-in parameter is part of the modeling software, but its value is not automatically set; it is possible that in an existing project, the parameter is empty. (e.g. fire-resistance rating)
- **Add parameter:** The element is present, the attribute is absent and neither is included in the IFC schema or in the modeling software. A new, shared parameter must be created.
- **Derived parameter:** the information can be deduced from the information already present in the building model if it is properly manipulated. This will be the selected solution if adding a parameter representation of the info is not adapted. Some attributes that are represented in IFC schema are not used in practice because the input can be too tedious and erroneous or require a mathematical operation. (e.g. SurfaceSpreadOfFlame, associated with an IfcElement: it is not necessary to set the flame spread rating to every single element type, can be obtained from the material information).

3.3.4.2 Element and property

The checking of fire safety regulation concerns simultaneously simple problems such as evaluating the fire-resistance rating or more complex fire separations continuity checking. Based on Solihin's categorization (Solihin & Eastman, 2015), the first example is evaluated as directly available information, because the fire-resistance rating is necessarily a manual input and cannot be derived. Whereas the second example is falls into the category of extended data structure, as there is a need for more complex information manipulation. First, a filter of which elements must be fire separations is needed. As the fire separations are

defined by the nature of the associated space, an exhaustive list of spaces was carried out in order to consider every type of constraint during fire protection. The Tableau 3.2 lists all the different names that are used in the Part 3 of NBCC and that are classified by the three different uses and means of identification by Dynamo.

Tableau 3.2 Lists of spaces as mentioned in the NBCC classified by the three different uses

One floor compartment with occupants	Fire-resistance rated compartments going through more floors	Service spaces
Service room	Stairway	Horizontal duct
Dwelling unit	Staircase	Attic
Electric equipment chamber	Exit stairway	Roof space
Public corridor	Emergency stairwell	
Laundry room		Suspended ceiling void
Lobby	Vertical duct	Horizontal service space
Rooftop structure		Horizontal void
bathroom	Lift	
Washroom		Vertical service space
Suite	Laundry chute	Vertical void
Hall-way	Garbage chute	
Secondary room		Service space
Mezzanine		Construction void
Basement		Sanitary void
Basement garage		Plenum space

During the study of the NBCC, an inconsistency in appellation, especially considering spaces, was found. When only several clauses were isolated, the lack of clear definition of the above listed spaces made it impossible to directly study the compliance checking without completely defining the redundancies, this is why an exhaustive list was made so that the during the building model preparation, all the necessary space are properly named. Then

categories of objects in these spaces can be studied further, such as identifying the relationship between different elements and retrieving the required parameters. These elements can be further isolated and processed into the object-oriented representation of the exchange requirement.

3.3.4.3 Exchange requirements

The exchange requirements are used in project coordination between different actors (architects and engineers, for example), however in the context of this study the exchange requirements need to be defined between the checking tool and the regulation text.

In this first part, the Level of Development (LOD) of different attributes are defined (Tableau 3.3). The LOD Specification is a reference tool intended to improve the quality of communication among users of Building Information Models (BIMs) about the characteristics of elements in models (BIMForum, 2013). In this case, this will help define which of the regulatory clauses can be really automatized considering the required LOD in comparison to the level of detail of a given model.

Tableau 3.3 Proposed table for synthesis of extracted objects from rule analysis
Adapted from N. O. Nawari (2018), Malsane et al. (2015) and BIMForum (2013)

Object	Attributes	Data type	LOD
Object 1	Attribute 1.1		100
Object 2	Attribute 2.1		350
	Attribute 2.2		400

Even though the minimum required information that must be present in the BIM model was defined, it cannot be ruled only by the regulation text, but it is also necessary to include the reality of today's advancements in the building information modeling details. For example, the Tekla Structures software can model every assembly detail, but does not permit to import in IFC the bolts and other fasteners and supports only essential geometrical elements such as

beams, walls (Tekla User Assistance, 2018). The nature and format of the exchanged information does not concern only the regulation text and the checking tool, but also the building model. Therefore, the following section will study the representation of the listed requirements in the BIM format.

3.3.4.4 Model Attribute Table

Through this research, it is possible to present some recommendations regarding fire protection needs, identifying the gaps of development and identifying domains that are not yet fully integrated in today's BIM models. First, a model attribute table is constructed based on the BIM Forum Element and Attribute tables and it was adapted to the present needs.

A Model Attribute Table (MAT) is constructed from data extracted from the building code regarding passive fire protection mentioned objects. This was deemed necessary in order to create a reference in terms of needed data. As opposed to the Model Element Table, the developed MAT (Tableau 3.4) integrates simultaneously the Elements and Attributes in the same table. This is because the fire protection related elements are under a smaller scope (substructure, electricity, schedule, supplier and other information is excluded here), but require more detailed information regarding the specifically addressed objects.

Tableau 3.4 Model Attribute table template for preparing building model for a code check

Category	Object	Attributes	Data type	LOD	Parameter type

The objects are not represented in the Unifomat format, because the classification of these elements is done manually. However, one of the criteria for automated verification was the need to avoid relying on manually transformed data and thus avoid erroneous result. The

object column represents the name of the object as it is retrieved from the Rule analysis based on the NBCC reference. In order to add the link with the building model, the first column of the table associates to the object a category. As shown in 3.3.4.2, the Dynamo scripts retrieve information from the building model based on a given category.

3.3.4.5 Application to fire protection in Canadian context

For more than 140 different objects, 35 different categories have been distinguished for the fire protection MAT. In the list, it is admitted that a certain number of elements will not be modeled by the modeler itself, but will use families furnished by the suppliers, given the number of necessary parameters that are required. Thus, the parameters related to these cases are listed in the table and are expected to be taken in account by the supplier. He also vouches for the accuracy of the data provided (in the same way that the fire-resistance rating is ensured by the supplier for gypsum boards). The doors contain many specific parameters such as door opening direction, automatic engagement etc. which cannot be derived by a study of geometry or positioning. Lifts as well, are not represented in the models apart by generic systems modeling. The NBCC specifies the requirements related to setups in the cabin, such as material and the floor area, which are not contained in the generic system representation. The MAT is a way to propose additional parameters for the family creators to include in their modeling practices.

The MAT analysis was conducted with constraints. The MAT is exhaustive in terms of categories and objects, and contains all the necessary attributes related to passive protection. However, attributes related to evacuation, active protection or mechanical engineering have been excluded as they are not part of the studied scope defined in literature review. The study still offers several general discussion topics related to these domains.

First, mechanical systems can contribute to fire propagation, especially if ventilation is assured mechanically. Therefore, NBCC requirements emit specifications related to service equipment design such as limiting the amount of exhaust air between floors, smoke

extraction etc. These aspects of fire protection cannot be addressed by the automated verification of the model, because they require a performance-based design and calculations that a simple compliance-checking tool cannot assure. The retrieval of data for BIM rule checking with data obtained from a performance-based external analysis is yet to be integrated (Johannes Dimyadi & Amor, 2013b; Solihin & Eastman, 2015).

Then, the protection of assemblies is an essential aspect in passive protection, especially in wood construction, where metal assemblies are likely to compromise the insulating capacity of the charred layer of a solid wood element. Thus, these fasteners must be protected sufficiently to prevent heat conduction inside a wooden element. However automating the verification of conformity of assemblies requires a level of detail of the order of LOD400. Furthermore, the assemblies are usually created in software that require IFC import to Dynamo (usually Cadwork is used for timber buildings as it is developed specifically for this construction material). The NBCC also prescribes gaskets, localized reinforcements as well as fasteners and other constructive devices that fall within the technical details that are present only on the detail views. However, the reality today is that such details are not transferred through IFC format and information in detail views are not possible to exploit in Dynamo.

3.3.5 Realization of rule checking with evaluation

As specified in 3.3.3.1, the implemented script returns two Dynamo lists, separately of compliant and non-compliant elements. The rule execution and results must be presented in a way that can be further manipulated and so that the data can be communicated as well. Therefore, the visualization inside Dynamo is not sufficient. This information must be therefore retrieved in a Rule check report and further use the obtained data, such as to communicate or save the results to track progression. Dynamo can export information to spreadsheets, therefore the Element ID and the Family type of each element is exported (Figure 3.8). A search through model by Element ID is then possible in Revit to identify individually the elements that need to be rectified by the functionality “Select by ID”. For

IFC format, the GUID exists so it is presumed that if other modelling software were to be used, it would remain possible to an alphanumeric code identifying specific element. The Family type of the element is complimentary information that is not necessary required, but was added as it contains a more explicit and user-friendly element identification.

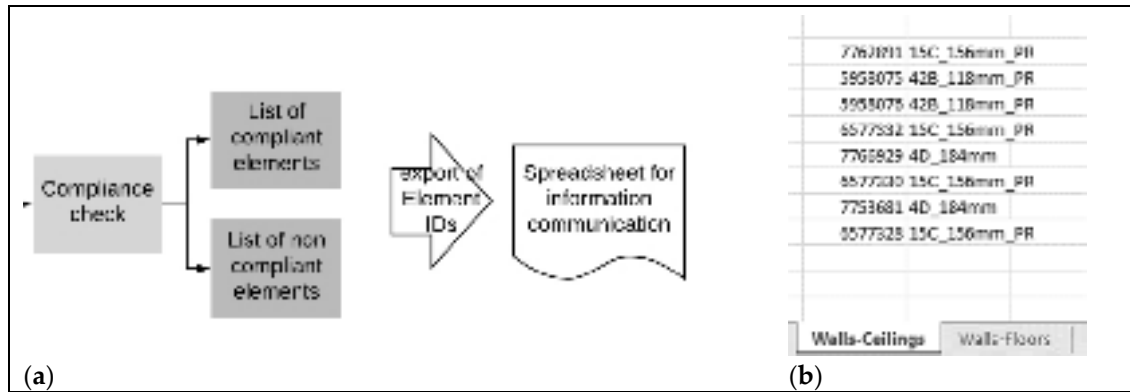


Figure 3.8 (a) Visual programming script structure for any compliance check; (b) Excel visual of the exported non-compliant lists, example of continuity

The export of Element IDs will be done through an association of several nodes and the final form of the reporting list in excel can be consulted in Figure 3.8. This falls under the category of graphical reporting, as the object data are retrieved. The reference to the required clause should be noted in the script.

3.4 Results: Proof of concept

3.4.1 Fire-resistance rating

The fire-resistance is the aptitude of an element to resist to a normalized fire based on three criteria of performance: mechanical resistance, integrity and isolation. The fire-resistance rating (FRR) represents the time where all the required criteria are respected and its value is obtained by several means. It can be retrieved from generic lists (e.g. in NBCC) or proprietary tests, such as in wood-frame assemblies with gypsum boards. Then in the case of mass timber buildings up to 12-storey, the FRR of the mass timber elements requires calculations by the structural engineers. Once they have defined the FRR, it has to be added

as a parameter for each element. The compliance check in this case assumes that the structural calculations are exact, as the role of this tool is not to compute structural stability of the building model.

The FRR concerns both structural and some non-structural elements. This represents one of the examples of interfaces between fire engineering, architectural and structural domains. Therefore, one parameter can be retrieved from numerous linked models, having different modeling practices. The structural elements either can be in a linked model or modeled directly in the architecture model. To distinguish these two cases, a Boolean input must be set at the beginning of the rule check depending of the case. This construction ensures the consistency criterion that was tested on two different models.

First all structural elements are retrieved, because they have all a 2-hour FRR requirement based on the NBCC. If the structural elements are present in the same model, the *Structure* parameter is used in Revit. It is therefore important to have the *Structure* parameter set as *true* for all the corresponding elements. On the other hand, the structure can be contained in separated BIM model and linked to the central model. The visual programming script have to take into account both of the means of elements retrieval.

Then the information about the fire-resistance rating parameter is retrieved, possible to do so by two means. The required information can be either contained in the name, where a specific designation for fire-resistance rating must figure (e.g. *RAF 2h* for two-hour fire-resistance rating) or in the *Fire Rating* parameter that is automatically associated with its IFC format equivalent (*FireRating*). It was chosen to develop these two ways of information retrieval (type name based or specific parameter based) following the study of the real project BIM model. It could be observed that both of these methods were used to store information about fire-resistance rating depending on the type of object. It is noted that the visual programming script is dependent on such details as units in which is expressed Fire-resistance rating (minutes or hours) and that the building model must be prepared consistently regarding the units. This contributes to loosen modeling rigidity and to limit the remodeling needs, therefore it adds to the usability criterion, where it is sought out to

integrate the rules optimally into the design process. Furthermore, all the necessary parameters for this rule check that cannot be derived have an equivalent in the IFC format.

3.4.2 Flame spread rating

The goal is to verify that all the interior finishes have the proper flame spread rating based on the NBCC prescriptive requirements. The flame spread rating (FSR) is related to the material and therefore it is a type parameter. This parameter can be contained in the IFC schema in the PropertySet, defined as SurfaceSpreadOfFlame. Indication on how the flames spread around the surface, it is given according to the NBCC that regulates the surface flammability of materials (buildingSMART, 2013). However, it is not considered useful to enter manually this data for each family type. The material is information that is entered more often when it comes to non-geometrical parameters in the building models and the flame spread rating can be derived from this information. Therefore, it is possible to use already present information in the model to verify flame spread rating compliance without adding any more data to the building model (usability criterion). The required FSR of each object is defined by its spatial position in the NBCC.

Three different aspects are approached here: categories, link with specific spaces and material standardization. First, all the categories that are considered are defined: walls, ceilings, slabs, glass and skylights, that are considered in the building model as curtain walls or windows and doors. Then, the associated spaces are defined, such as suites or vertical service spaces, as the constraints of the FSR depend on the position of the object. These constraints are represented in Tableau 3.5 and for the generic values of FSR in NBCC (table D.-3.1.1.A. (CNRC, 2010)). In this study, it is considered as acquired that the materials are compliant with the needed requirements concerning the material surface flammability.

The information about materials of a specific element is stored either as the 'material' property or in the 'name' property. Therefore, the determination of the finish's material will be done in two times, first will be examined the material property name (Material.Name). If

that is nonconclusive a second examination will be made with the name of the element (Element.Name). The goal is to associate each name with a corresponding FSR. This can be automated with a visual programming script if the input contains a series of lists of strings (character chains) that are representing the material FSR, for examples, compliant with the table D-3.1.1 of the NBCC (CNRC, 2010) (Figure 3.4). The user can modify at any time the lists containing different materials of the same FSR if necessary.

Tableau 3.5 Object oriented representation of clause 3.1.13.2. from NBCC
Adapted from CNRC (2010)

Space	Flame spread rating
Escape routes	25
Vertical service spaces	25
Entrance halls	25
Other lining	150
Compartment doors	200

The material property designation lack of standard in the BIM and therefore their names are not unified. It can be expected that from one model to another, the names of materials will not be represented in the same way, given that there is a choice of diacritics, language, capitals etc. To remove as much as possible these differences, the list containing the finishes' materials are normalized by removing the capitals and the diacritics, through a Python script. This makes it possible to list only a minimum number of items in the lists of materials sorted by the FSR values. Once the FSR is associated through the visual program to each material, it is necessary to verify that their placement is correct with the NBCC requirements. Each individual space is paired with the prescribed corresponding flame spread rating based on their names, according to Table 6. The verification of the flame spread rating of the finishes materials is performed with a short hard-coded Python script, which is needed in order to handle two lists of different dimensions. The output of this node is a true/false/unknown list of dimension L@3, corresponding to the compliance of each material finish associated with each object. The accuracy of the rule was re-checked, visually verifying the Material names and their values.

In regards to the FSR verification, there is no need for new parameters, every information is either automatically set in during modeling (material parameter), or the parameter can be derived from available data. It is still to be noted that there are specific needs in terms of modelling. All the rooms must be assigned a name, especially the ones that are subjected to a certain constraint in terms of FSR (escape routes, vertical service spaces and entrance halls) and that are easily non identified (vertical service spaces). If the rooms are not identified in any way by the modeler, the rule checking code cannot detect an anomaly. Two types of elements were not detected by the Dynamo script in the real building model used for the proof of concept: the shaft opening and the garbage chute. The garbage chute (in the real project building mode, the garbage chute was tagged, but only its entry and not the chute itself. However, these elements must be carefully designated, because they are going through several floors and therefore are a privileged way of fire propagation.

3.4.3 Fire separations

The retrieval of corresponding fire separations is a challenge that needs to be addressed, because it is subjected to many rules in the NBCC (continuity, openings, fire-resistance rating among others). It is an example of specific fire protection needs in terms of data interpretation, given that the fire separations can be vertical or horizontal and that the attribute fire separation is dependent on their associated space. However, if the example of walls is taken, in a suite compartment, there exist several types of walls: load bearing fire separations, non-structural fire separation and external walls or interior partitions and structural walls that are not fire separations. These are all parts of the same category *Wall* and can share the same BIM family type in some cases. The goal is however only to retrieve the elements that are forming the fire compartment in question.

First, different categories of elements, that can be fire separations, are selected by the visual program: walls, slabs, ceilings. The rooms classified by compartments are also retrieved. The manual input is necessary to select which level the compartments are studied (applies only

for the horizontal compartment). The visual programming scripts are working level by level in this case, because if a bigger model is studied with all the levels at once, it is too much data for the program to work properly.

The boundaries of a given apartment are drawn and based on these specified areas, the visual programming script can retrieve the corresponding walls based on the wall location lines. This removes from the study all the walls that are inside an apartment and do not need a specific fire protection parameter. Finally, all the studied elements must be classified by their compartment, slabs and ceiling will be classified by the compartment, in order to obtain the same format of lists, where the sub-levels represent each compartment. The consistency in list dimension ensures that in the future verifications, only walls from a certain compartment will be verified with the slabs from the same compartment. The specific node (Figure 3.9) is not a rule-checking script in itself with true/false results, but it is one of the most essential nodes, that are deriving information in the building model. Only minimum added information (area boundaries creation) was therefore required to obtain this new classification of building elements.

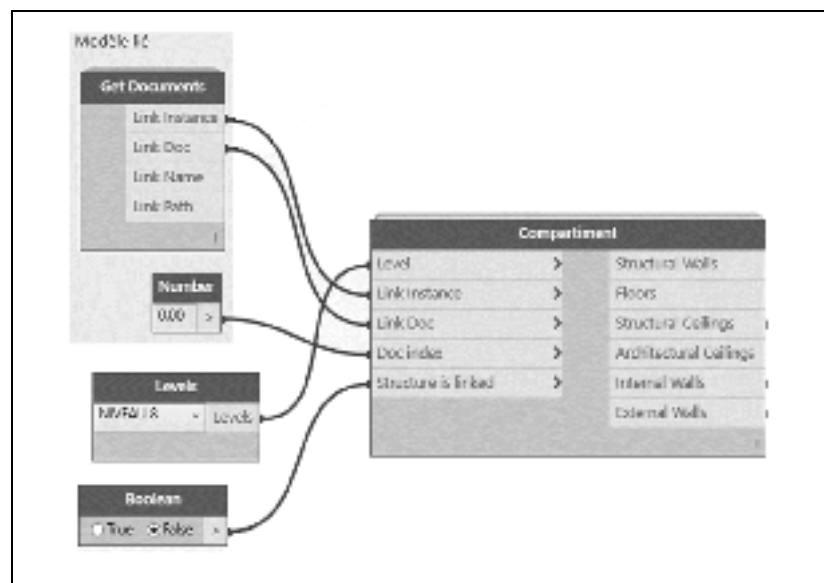


Figure 3.9 Compartment node with visualized inputs

3.4.4 Continuity of fire separations

Fire separations are compartment boundaries and a necessary condition for Room or Area creation in Revit is that the associated boundaries be continuous. Therefore, it means that once a compartment is created, the continuity of vertical fire separations is automatically assured. There is no further need to check if adjacent fire separations assure integrity.

Then, the goal is to create fire separation pairs, comprised of vertical (walls) and horizontal (slab above and below) elements. The hypothesis of simplification is that the suspended ceilings do not contribute to the fire resistance rating of the floor assembly (Canadian Wood Council, 1996) and the horizontal service space above the suspended ceiling is therefore not to be considered as a separate compartment in this case (Figure 3.5). The element reference here is chosen to be the fire separation wall. It was assumed that the compliance for integrity of the compartment is respected if every vertical fire separation has a connecting element above and below, and if their geometry overlays properly with a slab.

With the previously classified elements by compartment, three lists will be examined with the same number of sublists (Figure 3.10): the walls at floor level n , slabs at floor level n (below wall) and slabs at floor level $n+1$ (above the wall). For horizontal compartments, the upper surface and the bottom surface of each wall is retrieved. Similarly are acquired the bottom surface of the slabs of level above and the upper surface of the slab of the same level as the wall. Then the pairs of the two surfaces (Figure 3.11) are respectively checked for overlaying in order to associate a slab paired to it, below and above. The vertical fire separations without a slab or only with one slab associated are sorted as "non-compliant". As for the vertical compartments, the check is similar, but the lateral surfaces of the walls are examined with lateral surfaces of the slabs for walls crossing several levels. The continuity of the walls must be verified by this rule, otherwise it can lead to an accelerated fire propagation across floors.

The accuracy of the built script was tested on the real project building model. Details regarding a partition's height are sometimes neglected. Therefore there are situations, where the gypsum board, with encapsulating function for a timber wall, does not reach the ceiling above and therefore exposes the timber structure. The rule check accuracy is validated as even such small errors were detected by the script.

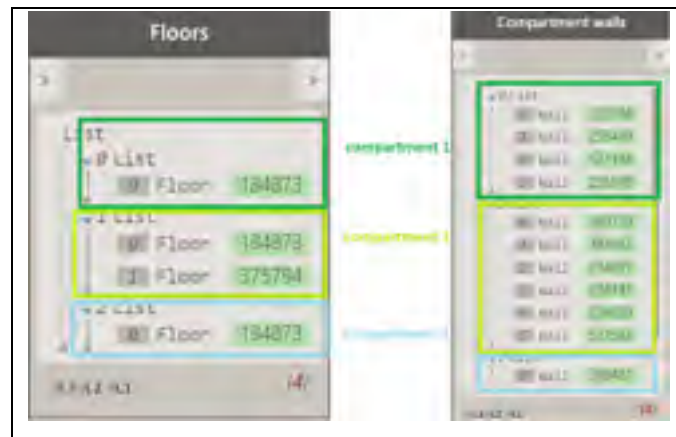


Figure 3.10 Corresponding levels of sublists for geometric study for the floor level n

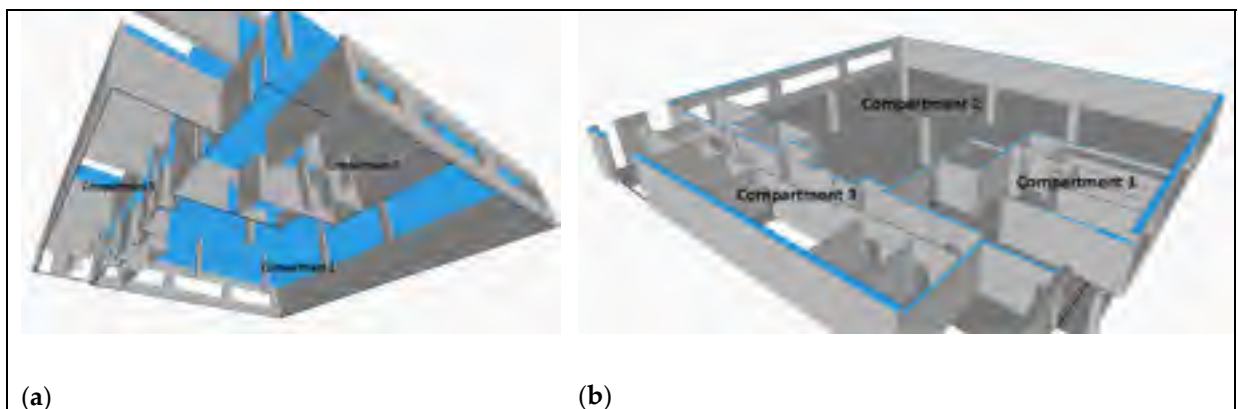


Figure 3.11 The highlighted geometries are checked if they overlap to respect fire separation continuity. (a) Slab on floor level $n+1$ lower surface; (b) Fire separating walls on level n upper surface with visible slab (floor level n)

3.4.5 Evaluation

Based on the criteria developed accordingly to the design science approach, the four different rule domains have been tested on two models in order to obtain the resulting evaluation, individual justifications of the results presented in Tableau 3.6 are detailed in the previous sections.

Tableau 3.6 Results of the evaluation by four defined criteria of the example scripts

Criteria	Non-geometrical parameters		Parameters with geometrical study	
	Fire-resistance rating	Flame spread rating	Fire separations retrieval	Continuity
Completeness	✓	✓	✓	≈
Consistency	✓	✓	✓	✓
Usability	✓	✓	✓	✓
Accuracy	✓	✓	≈	✓

The completeness of the rules is verified regarding the selected rules to check and not in regards to the complete NBCC, even though the fire-resistance rating check was considered as successfully translated rules, the following work should address the challenge of summing fire-resistance rating of different layers.

Then, the development was done with an educational model, and then tested on a real project model. Different modeling practices were found to be the most challenging aspect of the rule implementation. Therefore, many modifications had to be made to adapt the script. In order to validate the consistency of the scripts as the modifications were made, the modified script was re-run on the educational model. All the scripts have succeeded in the consistency test. It verifies the generality in terms of flexibility regarding the different modeling practices.

The more the method can cover different aspects (such as continuity control, choice of materials, etc.) the more general it will be. It has therefore been proven functional regarding

non-geometrical attributes. The checks requiring geometrical study are more challenging to address completely. The method can be used to relatively simple spatial relational queries, but does not contain the performance-based determined parameters. This means that active protection requiring dimensioning of sprinklers or smoke exhaust ducts, among others, are not covered by this method.

3.5 Discussion and conclusion

The method's intent is to build an alternative global solution using different tools that are accessible to everyone and that could enable AEC professionals to conduct a code checking evaluation of their design. The five steps of the whole process were described in a detailed way. It was shown that examples of both non-geometrical and geometrical study to verify compliance of a building model regarding NBCC fire protection requirements. It was demonstrated in the complete study of the method for compliance rule construction, that fire safety checking requires a lot of extensive data manipulation.

The visual programming has proven to be a powerful tool in regards to the data derivation and retrieval of specific information from the building model; it has performed very well in the context of the employed method especially for the non-geometrical elements. However, several domains related to fire protection requirements cannot be covered by this method, because the parameters required to run a compliance check are too detailed and complicated to input. In many situations, it would require adding a new parameter, which serves only one specific purpose and therefore adds burden on the modelling, which is not deemed sufficiently beneficial to justify the additional work. Therefore, if mechanical engineering were to be fully incorporated into compliance checking, a more detailed study related to the required attributes would have to be conducted in order to evaluate the usefulness of these attributes for other applications. It remains therefore challenging to check more complicated aspects related to geometric study, such as fire dampers position or determination of radiant heat view factor for limiting distance calculation. This kind of data manipulation can be done if hard-coded classification and manipulation of information by tables is more encouraged, as

the exploitation of arrays available manipulation through visual programming nodes becomes insufficient for such advanced geometric evaluation.

In this work are offered example rules that were proofed in practice on two different models in order to demonstrate that this method seeks mainly to withstand the challenges of different modeling practices. This has helped us to issue recommendations concerning data input consistency and reusability.

To conclude, this study offer a new view on the BIM requirements for automated rule checking and in the context of fire protection, showing especially that detailed rule check ask for very precise information input, which is not today considered as standard for everyone.

CHAPITRE 4

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Conformément à la liste des clauses présentées dans le CHAPITRE 2, les règles de vérification concernant ces éléments ont été implémentées. L'article de journal (CHAPITRE 3) présente les résultats des domaines suivants: séparations coupe-feu et continuité entre éléments adjacents, degré de résistance au feu, indice de propagation de la flamme, ici les résultats sont donc brièvement synthétisés en lien avec le CHAPITRE 2. Ce chapitre aborde également davantage la production du *Model Attribute Table* (MAT) et discute les résultats, notamment en termes des besoins de modélisation d'information.

4.1 Model Attribute Table

L'ensemble de la partie 3 du Code national du bâtiment a été étudié pour d'abord filtrer les clauses traitables. En effet, la formulation de certaines clauses est vague et donc ne permet pas une traduction adaptée à l'ordinateur. Ensuite, le but est d'associer les concepts et les attributs concernés pour chacune des clauses traitables à des éléments BIM. Il faut également prendre en compte la faisabilité en termes de modélisation BIM. Ainsi, le domaine de l'électricité (par exemple les systèmes d'alarme) a été exclu de cette étude car beaucoup d'éléments (tel que les signaux sonores) ne peuvent pas être représentés dans le BIM. De ces trois constats découle une nécessité de proposer un document *Model Attribute Table*. Celui-ci spécifie les éléments qui doivent être présents dans le modèle. Dans la modélisation BIM les éléments et leurs propriétés géométriques et non-géométriques peuvent être examinés et manipulés. Il faut donc s'assurer que l'information nécessaire soit contenue dans la maquette donnée. Le principal enjeu identifié au cours de ce travail était le lien entre le modèle BIM et les règles de vérification. Par la suite, l'accent a été donc mis sur les besoins en termes de modélisation. A la différence de certains travaux, le but ici était d'identifier les concepts dans les normes qui ne sont pas obligés d'être explicitement donnés dans la maquette, mais peuvent être dérivés grâce à l'information contenue dans le modèle. La capacité de dérivation des données avec la programmation visuelle a été démontrée dans la preuve du concept. Le

Model Attribute Table (MAT) proposé se trouve en ANNEXE III en guise de guide de modélisation, car un besoin de formaliser davantage les données a été ressenti lors de ce travail.

La MAT veut créer un lien entre le modèle BIM et les éléments nécessaires pour la protection incendie, à l'image de l'association du modèle 3D aux composantes du bâtiment dans le *Model Element Breakdown* (Boton, Rivest, Forgues, & Jupp, 2018). Dans le cas ici présent, un système de classification standardisé n'est pas utilisé, car une classification reste une information saisie manuellement et donc qui peut présenter des erreurs humaines. Pour pallier à cet enjeu, il a été préférée de garder la référence au niveau de la catégorie associée à l'objet ainsi que son nom.

Les paramètres sont classés en cinq types : Automatique, *Built-in*, Dérivé, Ajouté et Input. Les quatre premiers paramètres sont définis dans le CHAPITRE 3 et l'Input concerne les données qui doivent être saisies au niveau du dispositif de vérification (Tableau 4.1). En effet, il s'agit des recommandations émises à partir de l'étude basée sur la preuve du concept de quelques règles. Les critères de cette classification étaient la facilité d'utilisation dans le cadre de la modélisation et la limitation de saisie manuelle d'information. Étant donné que la conformité des données est à vérifier, certains aspects (généralement de nature géométrique), ne doivent pas être saisis naturellement pour conserver l'aspect de vérification de conformité. Par ailleurs rajouter l'information peut être dans certains cas beaucoup trop contraignant pour peu de valeur produite. Enfin, cela peut être enclin à des erreurs humaines, mais également ne met pas à l'épreuve le modèle, mais bien l'input manuel. Ainsi, la dernière colonne de ce tableau est dédiée aux paramètres Dérivés afin de rajouter comment cette information pourrait être obtenue. Enfin les paramètres qui portent la couleur orange indiquent les enjeux à aborder, que ce soit afin de trouver une méthode adaptée pour la dérivation du paramètre ou bien pour lesquels une solution aujourd'hui semble être peu réalisable.

Le MAT se veut être un guide pour la modélisation, autant pour les futurs travaux concernant la vérification automatisée (construction des règles) que pour les architectes (construction des

modèles BIM à vérifier en phase avec le MAT). D'abord, les constructeurs des règles vont se concentrer davantage sur les paramètres Dérivés afin de continuer dans l'élaboration des scripts de programmation visuelle qui vont permettre d'obtenir ces éléments. D'autre part, les paramètres Ajoutés, *Built-in* ou Automatiques sont présentés pour donner des indications au corps des architectes et guider la construction de la maquette qui serait compatible avec la volonté d'effectuer sa vérification automatisée.

La construction de MAT a alors permis de quantifier davantage ces besoins en modélisation, mais également de montrer les présentes limites de l'outil. Pour les 98 éléments explicites qui ont été identifiées pour les besoins de vérification de la protection passive, nous avons associés 578 paramètres. Dans la répartition des types de paramètre tel que proposé par ce travail (Tableau 4.1), nous avons presque la moitié des paramètres qui requièrent une dérivation, d'où la nécessité d'avoir les outils qui fournissent cette liberté. Ensuite, il peut être remarqué que la proportion des paramètres qui sont à ajouter et donc qui ne font partie ni des paramètres IFC, ni des paramètres internes à un logiciel BIM (ici application en Revit) reste toujours trop importante. Ainsi, cela permet de justifier l'éloignement du format IFC dans ce travail. Étant donné qu'il y a plus de paramètres à rajouter que des paramètres IFC, il est impossible de mener à bien un projet de vérification automatisée de protection incendie en se basant uniquement sur les outils supportant le format IFC. Enfin, il reste dans notre proposition de classification de paramètres une part de paramètres inconnus (?). Ces derniers désignent éléments jugés à présent non-représentables en BIM ou les paramètres dont le moyen de dérivation nécessite une étude plus poussée, qui sont basés sur une structure de données étendues ou sur une analyse basée sur la performance tel que défini par Solihin and Eastman (2015).

Parmi les 98 éléments, il y en a 18 qui semblent être aujourd'hui difficiles à modéliser dans le BIM, notamment pour des raisons de niveaux de détails trop élevés, que ce soit pour l'élément en lui-même (exemple : lame d'air) ou la plupart de ses paramètres exigés (exemple : ascenseur). Ils sont recensés dans la liste suivante :

- ascenseurs,
- câbles de fibre optiques,
- câbles électriques,
- cours intérieure,
- dispositif thermosensible,
- volets,
- éléments en saillie,
- joints,
- lames d'air,
- manœuvre de porte,
- ouvertures de ventilation,
- pare-feu,
- pièces de bois,
- pièces de fixation,
- suspentes des parois de faux-plafond,
- vide de construction,
- vide de faux-plafond,
- vidoir (vide-ordure).

Tableau 4.1 Proportion des différents types de paramètres

Type de paramètre	Total	%
Automatique	59	10%
<i>Built-in</i>	69	12%
Ajouté	99	17%
Dérivé	275	48%
Input	3	1%
Inconnu (?)	73	13%
Total	578	100%

Enfin, conformément aux résultats dans le CHAPITRE 3, le MAT a été construit pour synthétiser les exigences complexes des prescriptions. Nous étions confrontés aux aléas de la formulation des textes telle que critiquée par la littérature. En effet, des nombreux *dispositifs* spécifiques sont abordés dans le CNBC à plusieurs reprises mais ils ne peuvent pas être représentés par une unique catégorie d'objets. Par exemple, le paramètre de dispositif est très vague et peut à la fois prendre plusieurs formes, comme le *dispositif d'obturation, de dégagement, de relâchement, de fermeture*. Cela peut être vu comme un défaut du texte du point de vue de la vérification automatisée. Or cette expression vague permet à la fois la liberté de l'ingénieur de proposer des solutions optimisées et de ne pas excessivement rigidifier le cadre normatif. Ainsi, la formulation des prescriptions peut être critiquée du point de vue de la vérification de conformité, mais se justifie également dans certains cas.

4.2 Synthèse des règles implémentées

Les Tableau 2.1 et Tableau 2.2 comportent les clauses à implémenter dans le cadre du travail. Ainsi, les Tableau 4.2 et Tableau 4.3 rendent compte des résultats de cette transformation en règles de vérification.

Tableau 4.2 Résultats des clauses sélectionnées de CNBC

n°	Contenu de la clause	Résultats
3.1.8.3. Continuité des séparations coupe-feu	1. Sous réserve du paragraphe 3.6.4.2. 2), si un vide technique horizontal ou un vide de construction est situé au-dessus d'une séparation coupe-feu verticale exigée, y compris une paroi de gaine verticale ou de cage d'escalier, cette séparation doit comporter un prolongement équivalent dans le vide en question.	Succès Démarche : voir CHAPITRE 3
	2. La séparation coupe-feu exigée au paragraphe 1) doit comporter un joint étanche à la fumée à la jonction : a) d'un plancher; b) d'une dalle de toit; ou c) d'un platelage de toit.	Représentation d'un joint étanche à la fumée a été jugé trop détaillé pour être représenté dans le modèle BIM.

Tableau 4.2 Résultats des clauses sélectionnées de CNBC (suite)

n°	Contenu de la clause	Résultats
	3. Sous réserve de la sous-section 3.6.3. pour une gaine traversant un toit, une gaine, y compris les parois d'une issue, traversant une séparation coupe-feu doit: <ul style="list-style-type: none"> a) se prolonger dans toute la traversée des vides techniques horizontaux ou des vides de construction; et b) comporter un joint étanche à la fumée à la jonction: <ul style="list-style-type: none"> - d'un plancher; - d'une dalle de toit; ou - d'un platelage de toit. 	a) Succès Démarche : voir CHAPITRE 3 b) Représentation d'un joint étanche à la fumée a été jugé trop détaillé pour être représenté dans le modèle BIM.
3.1.8.6. Dimensions maximales d'une ouverture	2. Une ouverture dans une séparation coupe-feu intérieure qui doit être munie d'un dispositif d'obturation doit avoir une surface d'au plus 22 m ² et n'avoir aucune dimension supérieure à 6 m si les compartiments résistant au feu situés de part et d'autre de cette séparation sont protégés par gicleurs.	Les objets <i>Openings</i> ne sont pas présentes dans le modèle fictif. L'association aux séparations coupe-feu relève de l'étude géométrique plus avancée.
3.1.13.2. Indice de propagation de la flamme	1. Sauf indication contraire dans la présente sous-section, l'indice de propagation de la flamme des revêtements intérieurs de finition des murs et plafonds, y compris les vitrages et lanterneaux, ne doit pas dépasser 150 et doit être conforme au tableau 3.1.13.2.	Succès Démarche : voir CHAPITRE 3
	2. Sous réserve du paragraphe 3), il n'est pas obligatoire que les autres portes que celles des usages du groupe A, division 1, soient conformes au paragraphe 1), pourvu qu'elles aient un indice de propagation de la flamme d'au plus 200 (voir l'annexe A).	Succès Démarche : voir CHAPITRE 3
	3. Il n'est pas obligatoire que les portes à l'intérieur des logements soient conformes aux paragraphes 1) et 2).	Pas de vérification à faire

Tableau 4.3 Résultats des clauses sélectionnées du Guide RBQ

n°	Contenu de la clause	Résultats
1.3.1.	Les planchers doivent former une séparation coupe-feu ayant un degré de résistance au feu d'au moins 2 heures.	Succès Démarche : voir CHAPITRE 3
1.3.4.	Les murs, les poteaux, les arcs porteurs ainsi que les assemblages et les attaches doivent avoir un degré de résistance au feu d'au moins 2 heures.	Succès Démarche : voir CHAPITRE 3
1.3.7.	Les séparations coupe-feu entre les suites, et entre un corridor commun et une suite doivent avoir un degré de résistance au feu d'au moins 1 heure.	Succès Démarche : voir CHAPITRE 3
1.5.2.	Les escaliers d'issue doivent être isolés les uns des autres et du reste du bâtiment par une séparation coupe-feu étanche à la fumée ayant un degré de résistance au feu au moins égal à celui qui est exigé pour le plancher qu'ils traversent.	Succès Démarche : les espaces sont triés pour récupérer les murs associés et vérifier le DRF. CHAPITRE 3
1.5.4.	Tous les vides techniques verticaux, dont les chutes à déchets, doivent être isolés du reste du bâtiment par une séparation coupe-feu ayant un degré de résistance au feu d'au moins 2 heures et être de construction incombustible.	Succès Démarche : voir CHAPITRE 3

Pour 13 clauses séparées, 3 cas de figures ont été jugés comme non représentables par la méthode de vérification. Les transformations infructueuses relèvent de l'enjeu discuté précédemment dans le MAT, à savoir la nécessité de modéliser des éléments extrêmement détaillés. D'autre part, il peut être remarqué que, malgré l'effort de limiter les prérequis en modélisation, il reste cependant nécessaire de posséder certaines connaissances en termes de structure du modèle BIM lui-même. Cela a été montré à travers l'exemple de la gestion des ouvertures. Il a été nécessaire de quantifier les liens entre un objet mur et un objet ouverture qui lui est associé. La limite de ce travail reste donc la nécessité de maîtriser la structure des objets dans le modèle du bâtiment et le savoir concernant leur récupération.

4.3 Gestion des espaces

Comme vu dans le CHAPITRE 3, toutes les pièces et espaces doivent être définies pour pouvoir effectuer avec réussite une vérification de conformité. Cependant il est à constater que selon Eastman et al. (2011), la construction des espaces reste à être améliorée au sein des logiciels BIM, car la génération des espaces présente des lacunes notamment pour la hauteur de la pièce. En effet, l'élément 'pièce' n'atteint pas forcément le plafond, ce qui empêche d'exécuter certaines vérifications, comme l'emplacement des gicleurs. En effet, la géométrie du gicleur n'a pas été détectée comme appartenant à la géométrie de l'espace.

De plus, une des hypothèses émises au départ a été de choisir l'outil de programmation visuelle (Dynamo) afin d'assurer une complète liberté de manipuler des données et donc de pouvoir identifier les vides de construction et de sous-plafond, qui sont sujettes à des nombreuses restrictions dans le CNBC. Cependant, il s'avère qu'au cours du travail, une solution pour ces espaces particuliers n'a pas pu être trouvée. En effet, les vides de construction sont des espaces non habitables, que nous cherchons à supprimer ou à isoler et donc ils ne sont pas explicitement représentés par le modèle, le but de la vérification étant de les détecter. Or les logiciels de modélisation BIM sont orientés objet, donc si l'objet vide de construction n'est pas défini, le programme de vérification ne peut le détecter que si on lui attribue une définition implicite. A l'inverse de la détection des conflits, aujourd'hui démocratisée dans les pratiques BIM, ici on cherche à détecter quels éléments ne se touchent pas et donc créent un moyen de propagation de la flamme, alors que ces séparations devraient être en contact. Ainsi, nous avons résolu ce problème en définissant comme une des règles la vérification de la continuité des murs et plafonds séparation coupe-feu, ce qui résout le problème dans cette situation précise. La stratégie est d'inverser la logique et d'essayer de définir tous les cas de figures admissibles pour empêcher la création d'un vide de construction. Toutefois, il est nécessaire de mieux quantifier cet espace afin que sa détection puisse être implémentée pour les différents cas de figures, notamment pour la disposition des gicleurs, le choix des matériaux exposés et les conduits passant dans ces espaces.

4.4 Vers un standard de conception des maquettes ?

Pour que la vérification de conformité à partir d'une maquette numérique puisse être automatisée, il est essentiel de gérer le stockage des informations dans la maquette. En effet, un outil de vérification récupère des données à partir d'un emplacement précis (un paramètre en particulier) du modèle. Or aujourd'hui, les standards de modélisation restent très vagues et donc limitent l'utilisation des règles de vérification. En effet, il est difficile de créer des règles qui peuvent répondre aux différentes pratiques de modélisation (comme vu par exemple pour la récupération du paramètre Matériau dans la section 3.4.2).

Le domaine de la vérification automatisée requiert donc qu'un standard plus précis soit créé, que soit imposée l'utilisation de certains paramètres particuliers pour stocker les informations en question et selon lequel le milieu professionnel pourrait construire ses modèles BIM. Cela permettrait un gain de temps considérable dans la création des nouvelles règles de vérification et leur partage pourrait donc être favorisé grâce à leur versatilité.

Étant donné le nombre de paramètres élevé à vérifier et donc à extraire du modèle dans le cadre de la vérification automatisée, cette problématique peut être considérée comme un des principaux freins à l'essor du domaine de la vérification automatisée.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le domaine de la vérification automatisée de la conformité basée sur le BIM présente aujourd'hui un véritable potentiel pour la conception. Cependant, de nombreux enjeux persistent pour étendre son utilisation dans la pratique. Ce travail a donc consisté à constituer une méthode cohérente de vérification automatisée afin de montrer l'application aux enjeux de la protection incendie dans le contexte normatif canadien dans le but d'améliorer l'intégration de la protection incendie avec le BIM dans la conception des bâtiments en bois massif. Un objectif de la recherche était d'explorer les différentes initiatives en vérification automatisée présentes dans la recherche afin d'établir un lien plus étroit avec le CNBC. Pour comprendre et caractériser les besoins liés à la problématique, l'ensemble du processus de vérification a été étudié et testé. Cela a ainsi permis d'identifier les enjeux à aborder au cours de la construction des règles.

Dans le volet pratique, des éléments de vérification automatisée ont été implémentés pour le degré de résistance au feu, la propagation de la flamme, l'identification des séparations coupe-feu et la continuité des éléments coupe-feu adjacents. Alors qu'un nombre restreint seulement de règles a été choisi pour démontrer la possibilité de leur implémentation, la phase de validation qui se base sur un environnement de modélisation réelle a permis d'adapter l'outil aux différentes réalités de modélisation et ainsi optimiser son potentiel d'extension aux autres règles de vérification. En effet, nous avons choisi les clauses implémentées pour qu'elles puissent servir de base ou repère pour une construction plus détaillée. De plus, un *Model Attribute Table* (MAT) a été proposé et ainsi des éléments physiques ont été associés aux concepts de la sécurité incendie dans le CNBC. Le MAT se veut alors être un guide orienté objet qui recense les informations nécessaires pour construire un modèle contenant les données relatives à la protection passive. Dans ce cadre, il a également été vu que le code du bâtiment relatif et par extension le domaine de la sécurité incendie en général nécessite des règles de conformité très détaillées. Ainsi, un trop grand effort de modélisation peut être exigé par rapport à la valeur rapportée. Par ailleurs, la formulation ambiguë de certaines clauses de réglementation, souvent critiquée dans la

littérature, peut être également vue comme une nécessité afin d'accorder une certaine liberté aux concepteurs.

D'autre part, les enjeux rencontrés lors de la récupération des données du modèle ont mis en évidence la problématique reliée au standard de conception manquant. En effet, les modèles sont créés avec des problèmes en termes de qualité du modèle. Cette problématique est intrinsèque à tous les domaines du BIM qui souhaitent manipuler les données contenues dans le modèle pour les réutiliser à des fins telles que la vérification automatisée, la performance énergétique, l'estimation du coût ou encore la maintenance.

Étant donné que le processus est décrit dans son ensemble, les prochains travaux peuvent se concentrer sur des aspects plus particuliers, tels que la programmation des scripts pour dériver des paramètres identifiés par le MAT, la résolution de l'enjeu des éléments détaillés (tel que les joints) ou encore l'optimisation de la construction des règles du point de vue informatique. En effet, nous avons pu voir que l'automatisation de la vérification nécessite une grande part des paramètres dérivés. Leur création a donc été identifiée comme un des défis principaux, notamment en termes d'études géométriques avancées (comme des formes géométriques complexes, des espaces ou encore les relations spécifiques entre différents éléments du modèle). Ainsi, le travail a posé un cadre général dans le contexte canadien et a démontré la nécessité de poursuivre le développement de ce domaine.

ANNEXE I

TYPES DE PROPAGATION DU FEU DANS UN BÂTIMENT

Tableau-A I-1 Types de propagation du feu dans un bâtiment

Type	Cause de propagation principale	Moyens de propagation	Moyens de prévention
À l'intérieur de la pièce d'origine	Dégagement de la chaleur des objets ayant pris feu au départ (transfert de chaleur par contact direct ou rayonnement)	Mouvement par convection des gaz chauds Choix de matériaux au plafond et sur les murs	Choix de matériaux selon leur inflammabilité, les tests normalisés déterminent la réaction au feu et donc le risque du début d'un incendie <i>early fire hazard properties</i>
D'une pièce à l'autre sur un même étage	Géométrie du bâtiment permet la propagation des gaz chauds préchauffent la pièce suivante	Portes ouvertes	Portes à fermeture automatique et joints d'étanchéité au niveau des cadres
		Vides de construction	Séparations coupe-feu ne s'arrêtent au-dessus des faux-plafonds
		Joints parasismiques	Étanchéisation entre volée d'escalier et les murs associés par des plaques de plâtre, blocs de bois massif, etc. Joints d'étanchéité en matériau qui gonfle au contact avec chaleur Exécution de qualité

Tableau-A I-1 Types de propagation du feu dans un bâtiment (suite)

Type	Cause de propagation principale	Moyens de propagation	Moyens de prévention
D'une pièce à l'autre sur un même étage (suite)	Géométrie du bâtiment permet la propagation des gaz chauds préchauffent la pièce suivante (suite)	<p>DRF des séparations coupe-feu compromis</p> <ul style="list-style-type: none"> • passage des gaines techniques • mauvaise conception du degré de résistance au feu • passages du feu au-dessus du mur 	<p>Exécution de qualité</p> <p>Jointes d'étanchéité et isolation à l'extérieur des gaines</p> <p>Clapets coupe-feu à l'intérieur des gaines</p> <p>L'ensemble des éléments à prendre en compte</p> <p>Dimensionnement cohérent des DRF cohérents avec le reste du compartiment.</p> <p>Portes avec DRF dans une séparation coupe-feu</p> <p>Dispositifs d'obturation</p> <p>Séparations coupe-feu verticales sont continues jusqu'à l'étage supérieur</p>

Tableau-A I-1 Types de propagation du feu dans un bâtiment (suite)

Type	Cause de propagation principale	Moyens de propagation	Moyens de prévention
D'un étage à l'autre au sein d'un même bâtiment	Propagation des gaz chauds et de la flamme par l'intérieur et l'extérieur	Interfaces entre la dalle et murs à l'intérieur de la façade	Jointes étanches
		Vides de construction horizontaux et verticaux communiquant Cages et gaines techniques verticales	Clapets coupe-feu et grilles dans les gaines avec matériaux gonflants entre chaque étage DRF des séparations coupe-feu Jointes d'étanchéité entre cage et dalle traversée
		Espaces prévus pour permettre les mouvements thermiques et sismiques	Jointes d'expansion, qui assurent la fonctionnalité coupe-feu même après mouvement
		Par l'extérieur du bâtiment (bardage combustible, fenêtres ouvertes)	Optimiser la forme des fenêtres, étant donné que les formes étroites et petites favorisent la projection des flammes plus loin du mur Contrôle des matériaux sur la façade
Entre les bâtiments	Contact avec la flamme Rayonnement depuis les fenêtres	Bâtiments proches Bardage adjacent combustible Propagation par le toit (bâtiment en feu plus petit que le voisinage)	Contrôler la distance entre les bâtiments Contrôle des matériaux sur la façade et le toit Capacité coupe-feu des murs extérieurs (bâtiment adjacent)

ANNEXE II

BIM-BASED CODE COMPLIANCE CHECKING FOR FIRE SAFETY IN TIMBER BUILDINGS: A COMPARISON OF EXISTING TOOLS

Kristina Kincelova ^{a,b}, Conrad Boton ^a, Pierre Blanchet ^b and Christian Dagenais ^{b,c}

^a Department of Construction Engineering, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^b NSERC Industrial Research Chair on Ecoresponsible Wood Construction, Department of
Wood and Forest Sciences, Université Laval, 2425, rue de la Terrasse, Quebec City, Quebec,
Canada G1V 0A6

^c FPInnovations, 1055, rue du P.E.P.S., Quebec City, Quebec, Canada G1V 4C7

Article présenté à la 7th International Construction Conference jointly with the construction
research congress (CRC 2019), juin 2019

Abstract: The nature and the complexity of building codes, including the fire regulations, result in mainly manual verification and, therefore, in subjective potential interpretations or errors. In the case of timber construction, the fire safety regulations are moreover a challenge due to the combustibility of the material. Further integration of fire safety is needed during the design process in order to increase the reliability of the designs in terms of fire safety. Building information modelling (BIM) technologies offer today new tools for automating different tasks in the construction process. The different approaches and available tools have been therefore compared in the context of fire protection code compliance. For that matter, criteria applicable to the tools have been identified based on literature review and on the National Building Code of Canada prescriptive provisions, but also based on a practical manipulation of the available tools. The potential of the different tools is therefore assessed based on their integration of the fire protection concepts and on their adaptability to BIM. This contextualized comparison has shown that the fire protection integration in BIM is limited. The tools for performance-based fire protection design are not exploring enough the information contained by the building model that is beyond the geometry. The BIM-based compliance checking tools, in turn, contain insufficient space for fire safety regulations

checking as advanced spatial study is required for this purpose. Thus, this paper demonstrates the need for further development in terms of exploiting the building models' semantics in the fire protection context.

Keywords: BIM (Building Information Modeling), Code-checking, Building Code, Fire protection, Timber buildings

1. Introduction

Mass timber buildings gain more and more importance in the construction industry, due among others to the recent development of the cross-laminated timber (CLT) panels in the construction. This offers a new space for the use of wood in the construction of taller buildings. New initiatives take place around the world and feasibility studies are reported with possible designs that go as far as 42 floors (Östman, Brandon, and Frantzich 2017). However, in reality the highest mass timber building as of today is 18 floors high (The Brock Commons in Vancouver) (Fast 2016). Fire protection engineering appeared to be one of the main challenges to address in this case. Therefore, the domain of timber construction must always seek to enhance its fire safety aspect. This can be achieved by optimized fire protection design, which means better management of interfaces with other disciplines (National Fire Protection Association 2007) in the design process. The notion of collaboration implies that building information modeling (BIM) must be taken into consideration, given its ever growing integration in the working processes (Eastman et al. 2011). The BIM approach consists in using “a multidisciplinary object-oriented 3D model of the constructed facility to improve and to document its design and to simulate different aspects of its construction or its operation” (Boton et al. 2018). However several reports show the limited integration of fire safety challenges in the BIM methodology throughout the design process (SFPE 2011), (Norén, Strömngren, and Nystedt 2017)). The work presented in this paper is part of a more comprehensive research which aim is to propose a global approach to enhance the integration of fire protection concepts related to timber buildings earlier in the design phase. This brings up the question of how available tools today manage

to cover the needs in terms of fire protection during the design process. The objective of the paper is therefore to first identify the criteria that are essential for evaluating the existing tools and then to execute an objective comparison of the tools according to the needs that are characterized in the first step. It is organized into three main sections. First, the normative context of timber buildings is described in order to understand the needs and the challenges in the building design process. Different tools that are integrating BIM are also listed. Then, criteria are characterized both for fire protection and BIM integration. Their construction is not only based on literature review of fire protection concepts, but they are also taking in account the reality of observed design and modeling practices. Finally, a comparison for all the identified solutions is carried out based on these criteria.

2. Related works

2.1 Timber building in Quebec: the fire safety challenges

In the context of the Quebec construction industry, the fire safety is ensured by two regulatory documents: the National Building Code of Canada (NBCC) (CNRC 2010), that is modified at the provincial level in the “Code de construction du Quebec”. Then specifically for Québec was established the technical guide entitled « Mass timber buildings up to 12 floors » (Veilleux, Gagnon, and Dagenais 2015). These regulations prescribe conservative measures to ensure protection of occupants and properties. The regulation context is today identified as one of the main reasons why constructors do not choose mass timber as a construction material (Gosselin et al. 2016). Indeed, tall buildings need to assure very strict fire safety conditions (Östman, Brandon, and Frantzich 2017), that is why it is necessary to prove efficient tools for designing and verification of the fire safety regulations compliance.

Regarding fire safety, the protection of life, property and environment must be considered during the design. Several domains are impacted, including electricity, mechanics, architecture and structure. More specifically, one can distinguish two types of fire safety systems (Buchanan and Abu 2001): active control (sprinklers and other suppression systems) and passive control (fire resistant structure). If the construction material is a combustible

material such as wood, it is possible to optimize the construction if more attention is allowed to the aspect of passive protection. The following work will be therefore restricted to the study of passive systems. This concerns two branches of the NFPA (National Fire Protection Association) Fire Safety Concept Tree : “Contain Fire by Construction”, which implies the need of integrity of fire separations and their continuity, as well as fire resistance of assemblies (Canadian Wood Council 1996). The second relevant branch in our context is the “Control of Fuel”, this means that the ignitability and surface flammability of interior equipment is a crucial aspect of fire growth (Quintiere 2002).

In Canada, compliance to the NBCC can be achieved by complying with the acceptable (prescriptive) provisions found in Division B, or through alternative (performance-based) solutions that will achieve at least the minimum level of performance required by Division B in the areas defined by the objectives and functional statements attributed to the acceptable solutions. (Hurley et al. 2015) define performance-based design as a set of specific fire safety goals and objectives. This means that more complex fire scenarios are developed during the design and accordingly more alternatives are proposed to attain the set goals. This is done by “quantitative assessment” of the behaviour of proposed active and passive protection systems (Buchanan and Abu 2001). More specifically, “accepted engineering tools, methodologies, and performance criteria” (Hurley et al. 2015) are used to obtain the performance of the alternatives. By engineering tools, we mean technologies that support the fire protection design, such as software sprinklers design, hydraulic calculations and computational fluid dynamics (Autodesk CFD). It is observed that some of them are starting to integrate elements of BIM (SFPE 2011).

Even though the performance-based design is used in other code domains, Canadian regulations that are effective today are still very prescriptive oriented. According to the Canadian Wood Council (1996) and more recently Dagenais and Desjardins (2012), more performance-based elements are being added; nevertheless, the prescriptive requirements remain more prevalent. In the prescriptive design, “strict definition of dimensions, construction methods, and other features” (Hurley et al. 2015) are to be respected. However,

this verification is still done manually and thus can contribute to some errors. If a climate of trust is to be established in the timber construction industry, the fire safety has to gain more prominent place in the design process. Whether the fire protection is performance based or respects prescriptive requirements, the integration of BIM in the fire protection design needs to be studied as BIM is more and more present in the building process.

2.2 Available approaches and tools integrating BIM for fire protection

Three types of software tools specifically developed for fire protection engineering have been identified. First, solutions for fire suppression system design exist, where the sprinklers disposition and piping design with hydraulics calculations is approached. Second, the simulations of pedestrian dynamics are used for egress routes design. Finally, according to (SFPE 2011), this fluid dynamics simulation tools can evaluate buildings structural ability, demonstrate tenability and validation of smoke control systems. For example CYPECAD with the NIST Fire Dynamics Simulator (FDS) module was developed by the National Institute of Standards and technology (NIST) (CYPE 2012) and similarly, Autodesk has Autodesk CFD software. In terms of BIM integration, these tools use mainly clash detection and retrieval of general geometry for obstacles determination in exit routes and smoke spread determination. However, only fire protection engineers can use these solutions and once the final building model is created and therefore the fire protection concepts are integrated very late in the design process. Furthermore, the semantically rich character of the building information models is not used. For that matter, automated code-checking can be seen as a prospective tool that can provide architect with quick feedback (Eastman 2009). It is an emerging domain of BIM-based technology (Preidel, Daum, and Borrmann 2017) and is defined by Eastman (Eastman 2009) as a software, that “assess a design” without its modification by applying rules and constraints.

Growing number of research studies are exploring different approaches for automated code checking, including non-geometrical capacities of the building models and addressing related challenges such as translating the building norms into computer-readable form (Lee et

al. 2016; Hjelseth and Nisbet 2011), discussing if present object-based models are adapted (Greenwood et al., 2010; Malsane et al. 2015) or studying rule construction practice (Solihin and Eastman 2015; Porto et al. 2018).

Aside from the theoretical research approaches, there are three main commercially available solutions for BIM-based automated code checking: Solibri Model Checker (SMC) by Nemetschek Company ((Taciuc, Karlshøj, and Dederichs 2016, Eastman 2009)), Fornax developed by novaCITYNETS Pte. Ltd. Singapore (novaCITYNETS 2002; Solihin et al. 2017) and EDM Jotne by Jotne IT (Ding 2006). These tools are not built specifically for the fire protection engineering and are mainly concentrating on the accessibility requirements (Eastman 2009; Solihin and Eastman 2015). Similarly, to SMC, there are also several solutions for model quality checking on the market that are generally focused on the data quality of the semantically rich model. Among these can be named a model quality checker BIM Assure by Invicara or dRofus by Nemetschek Company for spatial program requirements planification and rooms management.

However all these commercially available solutions are criticized for their lack of flexibility and ‘black-box’ aspect (Preidel, Daum, and Borrmann 2017; Greenwood et al., 2010) or they are requiring extensive software development skills (Kim et al. 2017; Nawari 2018). This is not compatible with the ordinary end users: the regulation specialists, which will have to construct the computer-readable rules (Preidel, Daum, and Borrmann 2017). Another approach discussed in the literature for automated code-checking is visual programming. In the present day, the visual programming already exists in the BIM environment for parametric design. We can cite as main providers the Grasshopper for Rhino (Abvent) or Dynamo for Revit (Autodesk) or Marionette for Vectorworks (Nemetschek), that are mainly used in architecture. Furthermore (Preidel, Daum, and Borrmann 2017) define a new visual programming language specifically built for code checking and (Kim et al. 2017) also developed a visual programming approach to the Korean Building Act. Among all these solutions, none of them addresses properly the link between the rule checking tool and the building model information requirements. Therefore, the possibility of adoption to the

Canadian fire protection context needs to be further studied. We are restraining our study to the application on timber building's fire protection.

3. Research approach

In order to carry out a complete and meaningful comparison, criteria of comparison must be identified and the available tools must be listed. First, the regulations cited in section 2 have been analysed from the object-oriented perspective in relation to the BIM point of view. The critical elements of fire safety regulation can therefore be identified. To support this work, a practical test of the regulation translation into computer-readable rules is executed on an education building model in order to examine the needs from the design process standpoint. This means that examples rules addressing different aspects of passive fire protection have been selected in order to identify in practice the needs in terms of building information modeling. Then, the available tools have been mapped; this includes not only the code checking software, but also the software used by fire safety engineers during the design process in order to compare the forces and the weaknesses of each approach. Therefore, a more BIM oriented approach will be compared with more fire protection-oriented approach. The comparison is based on different types of accessible documentation for the products. The different applications of such tools have been critically compared to the needs in terms of fire safety. Aside from available peer reviewed literature that could be used for SMC, EDM and Fornax assessment, other sources of information had to be used. The criteria have been practically verified on two available solutions (SMC and Dynamo for visual programming). Then technical guides, and internet description of the functionalities, demonstration videos of working software and reviews of different users, as practically tested, were sources of information for the other tools.

4. A contextualized comparison of existing tools for code checking

4.1 Criteria determination

This section presents the criteria identified for the comparison of existing tools. The criteria related to the fire safety are differentiated from the BIM-related criteria.

4.1.1 Fire safety related needs characterization

In this part, we are not addressing whether the software is able to detect a compliant or a non-compliant element, but whether it is able to identify and work with a certain fire protection concept and access the related information. It is important to mention that in fire safety, several properties that must be checked are non –geometrical (such as properties of materials, fire-resistance rating of assemblies) or demand advanced spatial relationships study (continuity between fire separations). The following criteria were constructed, based on the regulation literature ((CNRC, 2010), (Canadian Wood Council 1996), (FPInnovations, 2014), (Buchanan and Abu 2001), (Veilleux, Gagnon, and Dagenais 2015)), as essential for a first fire safety specific compliance checking tool. The study being restricted to the aspect of passive fire protection, the criteria that are presented bellow represent necessary conditions for controlling the design in terms of fire containment and its spread.

Use of results from another defined rule: (Solihin and Eastman 2015) define as derived property an information in the building model that is not presented explicitly, but can be obtained if other necessary data are present. The possibility of creating new derived properties is an essential requirement for a functional and complete rule checking tool (Eastman et al. 2009). This is especially challenging for fire safety regulations as in the Canadian context they are interdependent, which must be translated into the computer-readable rules.

Flame spread rating based on material property: This specific property is an example of why the possibility to derive parameters is necessary. In fact, the flame spread rating is

related to the material and therefore there is no use for the explicit input from the modeler's standpoint. The capacity of the tool to deduce the value of this requirement is an important criterion in terms of limiting the fire growth. The results from a software point of view will be equivalent for other constraints, such as smoke development class and other parameters, which can be derived from other information present in the building model.

Fire-resistance rating: Fire-resistance rating requirement must be set independently from the individual element modeling, it depends on the function of space that the fire separation encloses as well as on the adjacent fire separations.

Control of fire dampers position: This criterion is specific in terms of inter-disciplinary integration, as the fire damper is in HVAC scope and the fire separations are in an architecture model. Advanced geometrical requirements are expected here and it must be possible to study relationships between elements. The criterion is met if the solution is able to detect a fire damper and associated fire separations position.

Creation of compartments: The possibility of creating compartments is essential for checking numerous rules for fire protection, because it defines essential list of vertical and horizontal fire separations, with or without a fire-resistance rating. Which in turn are going to be subjected to other constraints (as seen above). It must be possible to create compartments that contain more than just one room.

Continuity of fire separations: All the fire separations must be connected to other fire separations with a coherent prescribed fire-resistance rating to assure integrity throughout the required fire-resistance period. The tool must be able to detect and work with spatial relationships between elements, such adjacent surface intersection or continuous walls that cross several floors.

Fire separations openings control: The checking tool is able to detect relationship between a fire separation element and its opening, through which fire can spread.

Fire load calculation for a compartment: This criterion is part of the performance-based approach only. For this execution is needed among others the weight of every material in the given compartment. This is similar to the material take-off for cost evaluation of a project, except that the different material volumes must be associated with their density and their heat release rate, instead of the cost. Given that a simplified approach of this calculation for the fire load is linear, it is something that a code checking tool should be able to execute. NFPA 557 provides a methodology for determining of fire loads for use in structural fire protection design.

4.1.2 BIM related needs identification

In this part, we examine the criteria from BIM point of view, independently from the fire regulation context. The criteria have been attributed importance when the practical preliminary test has been carried out.

IFC compatibility: The tool must support the interoperability IFC standard in order to participate to the global support of collaboration.

Possibility of direct modification: If a code-checking solution detects a problem of non-compliance and it is possible to directly modify the geometrical and non-geometrical properties, the designer can instantly modify the information based on the feedback received by the tool, which is a more advanced level of automation. The question then is if the direct modification of a parameter is sufficient for the model to be compliant, as there is a reality behind the attributes and there is a reality behind the parameter values that cannot be changed only in the checking tool.

Possibility to directly add missing information: This criterion is similar to the option of direct modification. In this regard, the completed information can either stay located only in the given tool, or the tool can be able to put the information in the building model which enhances the collaboration.

Accessibility: The tool must be accessible for people that want to create new rules, novice programmers or users with virtually no experience in coding must be able to work with the tool. The need for software development skills is to be avoided, among others because a hard-coded tool is harder to keep up to date.

Compliance with norms reporting: Given that the regulations are essentially prescriptive, it is possible to obtain results in form of a true or false evaluation most of the time. We take in consideration that the person performing the compliance check will be an architect and therefore will not be necessary a specialist in the fire protection engineering, the results should be presented in an accessible manner.

Flexibility of rule creation: The user must be free to create rules that he needs, without being restrained by the tool rigidity. This is different from the accessibility of rule manipulation. This criterion is concentrating on the user's liberty to create new rule. If he has the necessary programming knowledge, the tool must to be restrictive in terms of new rule production.

4.2 A comparison of the existing tools

First, each tool's functionality is critically assessed against the above defined criteria. The presented tools are representative of different approaches (cf. 2.2.) during the design phase : SMC with DesignCheck and FORNAX for automated code-checking commercial solutions, dRofus for the spatial programming, BIMAssure for model quality checker and the FDS module with Autodesk CFD are for fire simulations with different functionalities, finally we have Dynamo for the visual programming research approach. The obtained information is then synthetized in an overall comparison presented in.

First of all, the code-checking solutions' functionalities are studied. SMC has been practically tested against the defined criteria in 4.1 and it has been observed, in accordance

with the literature review, that the manipulation of information in this tool is very restricted (restricted rule creation possibility). First, the results from one rule are not saved so that another rule can further manipulate this derived data and the results of a certain rule cannot be reused in another rule, this also means that flame spread rating cannot be verified here. Then the compartmentation can only be defined based on manually entered parameter or on element type. However, the fire protection function of an element is based on its spatial position and the relationship with other specific elements. These limited spatial operations impact also the fire damper or fire-resistance rating determination. As for BIM integration, the tool is very mature with graphical and user-friendly interface (accessibility). The software can manipulate several IFC models at the same time and all the imported elements are automatically classified by Unifomat, it is also possible to assign specific names to individual rooms directly inside the tool for limited possibility of directly adding missing information.

Tableau-A II-1 Software solutions for evaluation

Approaches		Automated checking					Fire safety engineering		Visual programming
Tools		Solibri Model Checker	DesignCheck	FORNAX	dRofus	BIMAssure	CYPECAD MEP - FDS	Autodesk CFD	Dynamo, Grasshopper)
Fire safety	Use of results from another defined rule	×	-	-	×	×	✓	×	✓
	Flame spread rating based on material property	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	✓
	Fire resistance rating	✓	✓	✓	×	✓	×	×	✓
	Control of fire dampers position	×	✓	✓	×	×	✓	×	✓
	Compartment creation	✓ (complicated input)	-	✓	×	×	✓	✓	✓
	Continuity of two fire separations	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓
	Fire separations openings control	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓
	Fire load of a compartment	×	-	-	×	×	✓	×	✓ (Simplified approach)
BIM	IFC compatibility	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓ (Through given BIM software)
	Possibility of direct modification	×	-	-	✓	✓ (only non-geometrical parameters)	×	×	✓
	Possibility to directly add missing information to the model	×	✓ (only space qualification)	✓	✓	-	×	×	✓ (Through given BIM software)
	Accessibility	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	×
	Compliance with fire protection norms reporting (true/false results)	✓	✓	✓	×	✓	×	×	✓
	Flexibility of rule creation	×	✓	✓	×	×	×	×	✓

Then in EDModel Server's DesignCheck, an internal model is developed, which extends the IFC model in order to obtain derived properties (Ding 2006). We conclude that the data derivation functionality makes it possible to create such queries as fire-resistance rating or the flame spread rating verification. Due to the lack of available references, more information in term of fire protection potential could not be deduced from other confirmed functionalities. Regarding the BIM criteria, the software supports interoperability provided by IFC and the tool is operating in ExpressX that is native language of IFC. The API toolkit is fully available (Jotne EPM Technology AS 2018) which makes it very flexible to create rules, but becomes limited in terms of accessibility for users unfamiliar with programming, however the user is then interacting only with an adapted interface of the Express Data Manager. It is also used for all communication with the EDMdatabase of the EDM Server and the model checker

associated with EDM is an application that is also invoked through this interface (Jotne EPM Technology AS, 2018) which makes it possible to add missing information based on the compliance assessment.

The last assessed code-checking solution is FORNAX. For the fire protection criteria, the possibility of data transfer between different FORNAX objects is unknown, therefore it cannot be concluded on the use of results from other rules or on the fire load calculation. Then, the system can operate with geometrical objects as inputs (Solihin et al. 2004) and that are then enhanced in the tool, thus derived parameters such as fire-resistance rating and flame spread rating verification should be possible. Solihin et al. (2004) demonstrate data manipulation that suggests that it would be possible to compare and deduce if the position of fire damper is compliant with the apartment's limits. Regarding the BIM criteria, the possibility of direct modification of parameter is unknown; however missing information in the model can be added due to the FORNAX object that enables extension of the IFC imported objects (Greenwood et al. 2010). According to (Solihin et al. 2017), FORNAX provides a toolkit API which insinuates that the creation of rules, including the study of geometry such as compartmentation and closure control, would be flexible. It also means that the accessibility for rule creation is limited to software developers. FORNAX is a very developed compliance code-checking tool, therefore the checking result reports are not only textual, but also graphical: non-compliant elements are also highlighted (Solihin et al. 2004).

Then the quality model checker solutions have been assessed. Based on the user guide (dRofus 2016), we have listed its prospective functionalities possibly applicable for the fire requirements. First, no data derivation as defined by (Solihin and Eastman 2015) is possible, which makes it impossible to study the flame spread rating information or the fire load evaluation. Then, the geometrical properties or space interferences cannot be considered by the tool, which excludes compartmentation, continuity or opening of fire separation control. No rules are created in dRofus, however there is a possibility of comparison of planned data and real data in Revit or Archicad. For this however, all the necessary rooms have to be created in order to compare the data (such as interior finishes) which is an extensive amount

of work that is not efficient unless the designer already has integrated the spatial planning in dRofus for other purposes of the project as well. The tool has only shown very satisfying results in terms of BIM integration and accessibility but is not adapted to fire safety related needs.

BIM Assure in its turn creates rules to check model data presence against the project's (Invicara 2018). In the context of fire protection, it is possible to detect if a fire-resistance rating or a flame spread rating is put in, but it is not possible to check if the value is compliant with the regulation requirements. Therefore, a standard quality model checker cannot be used for fire protection compliance checking. Furthermore, it was concluded based on (Khemlani 2016) that the application cannot detect geometry compliance and neither it is able to study relationships between different elements. Thus, the use of compartmentation and of results from another rule is not possible in this tool. In terms of BIM integration, the tool is very advanced among the solutions studied here. In fact, the IFC format is supported (Invicara 2018) which contributes to the independence of the software regarding different users. Furthermore, the non-geometrical properties can be modified. Regarding the creation of rules, it is fully integrated to the software therefore there the accessibility for users is respected, however the flexibility of creation is restricted. Then the results are presented as true or false report in spreadsheet format (Invicara 2018). Finally, the flexibility regarding rule creation is only partially respected as it is restricted to non-geometrical parameters.

Moreover, the CFD solutions are assessed. In CYPECAD with the NIST FDS module, the simulation is very complete, therefore the physical interdependencies are taken in account: when the fire is simulated, it also takes into consideration the presence of sprinklers and therefore it is possible to evaluate if the compartment reaches flashover (CYPE 2012), however it does not take into account the fire ranking, as its capacities are centered around fire dynamics. Different fire safety concepts are available in the tool, including calculation of the fire load based on modeled room finishes and objects. In terms of BIM integration, the module supports IFC format. In fact, the geometry of the building is either manually entered, or the information is imported by IFC in the Cypecad software. Then the properties related to

materials (such as conductivity of different layers) that are necessary to carry out the simulation are entered inside the tool (CYPE 2012). The other BIM required criteria are not addressed by this solution.

Then Autodesk CFD is based on similar functioning as NIST FDS simulation, except that it does not contain the special fire dynamics module. Therefore the imported building geometry is only viewed as obstacles for the flame and smoke spread and all the non-geometrical parameters are lost during the CFD simulation (Autodesk CFD 2019) therefore the fire-resistance rating and flame spread rating are not considered. Furthermore, the fire load is not calculated based on the building model, but an equivalent heat source is calculated and placed in the building before the simulation (Munirajulu 2018). In terms of BIM integration, the construction supports IFC interoperability and if a Revit building model has been imported to the Autodesk CFD, the walls can be modified in the software, however no information is available concerning this functionality for IFC models.

Finally, Dynamo with Revit has been assessed in the preliminary test to demonstrate its ability to execute code checking-based scripts. In terms of fire protection criteria, all the approaches have been practically tested. The creation of rules is extremely flexible and only limited to the Revit API, even though this requires software development skills. However, the requirements in terms of programming are less important given the graphical interface and the extensive third-party methods development. The building model is accessed through the modeling software for the plug-in or directly imported in the stand-alone Dynamo software, therefore it is IFC compatible. It is possible to create new elements in Dynamo through the visual programming interface given the parametric design character. Then, specific scripts must be developed to detect or add missing information, however it is less intuitive than the quality model checker interfaces in terms of these criteria. The resulting lists are presented in true or false format and the results can be exported in excel sheets (in a similar way to BIM Assure).

To conclude, the Tableau-A II-1 shows that there is a need for more fire protection and BIM integration. In terms of software solutions, the performance-based and prescriptive approaches are very different. First, the performance-based software runs a series of calculations involving CFD and visualizes the fire and smoke spread (Autodesk CFD 2019). Opposed to this, the automated checking tools will be object-oriented and therefore based on the present elements: all the possible solutions respecting the prescriptive code must be listed. The first approach is not adapted as a decision support tool, because of the complexity of execution, whereas the automated code-checking execution is expected to be very quick. Even though the code-checking will not be as complete as CFD simulation, we can already optimize in some ways the geometry earlier in the process. Therefore, we can view the two approaches as complimentary if their integration in BIM process is improved. Finally, the code checking of a building model for performance-based regulation compliance is more complicated, because the goals are more general. The prescriptive design is very adapted to the automated code-checking features of the building information modelling and is more aligned with the goal of this paper to bring quick fire protection feedback to the designer.

5. Discussion and conclusion

The work presented in this paper aims at comparing the existing tools for automating code checking for fire safety regulations. It can be seen that the tools designed for automated code checking respect more the BIM related criteria and have more advanced code checking capacities. This proposed comparison brings attention to the fact that the existing code-checking solutions fail to answer to the fire protection challenges, showing that this domain has specific needs in terms of modeling and as of now, there is a lack of integration in the BIM driven design process. Furthermore, the focus is not addressed to the whole process. Indeed, we can clearly notice a lack of attention paid to the model preparation aspect and the creation of the rules in coherence with the level of development of the model. This paper has therefore contributed to set foundations for the building model requirements and to practically identify critical challenges in the context of a more global work related to BIM-based fire protection code-checking in timber buildings in Québec.

The main challenges to address can be summarized into the four stages of a rule checking process defined in the framework proposed by Eastman et al. (2009): 1) rule interpretation, 2) building model preparation, 3) rule execution and 4) rule check reporting. This means that especially for fire protection, it is necessary to provide accurate guidelines for building model preparation and avoid demanding extensive information manual input that the modeler does not need to provide. This optimization in term of data supply can be done only if the whole process of code-checking is understood. Unfortunately, there is a lack of research combining all these stages in a comprehensive and consistent method. In the future works, this lack will be addressed, focusing on the challenge of information transfer from one step to another and regarding the specificities of the fire protection compliance. In order to validate this method, the compliance check will be carried out on an actual project in timber construction industry.

6. Acknowledgements

The authors are grateful to Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada for the financial support through its ICP and CRD programs (IRCPJ 461745-12 and RDCPJ 445200-12) as well as the industrial partners of the NSERC industrial chair on eco-responsible wood construction (CIRCERB).

ANNEXE III

MODEL ATTRIBUTE TABLE

Tableau-A III-1 Model Attribute Table

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD 100	Parameter type	Moyen de dérivation/Remarque
Area	aire de plancher	distance de parcours maximale		double	300	Derived	étude spatiale
		protection par gicleurs	entièrement OU partiellement OU n	String	300	Derived	Gicleurs-protection
		issues associées		Area/Room/D	300	Derived	étude spatiale
		étage		Level	200	Automatic	
		moyens d'évacuations associées		Area/Room/D	300	Derived	étude spatiale
Beam	arc porteur	épaisseur		double	200	Automatic	
		largeur		Double	200	Automatic	
		éléments de jonction aux extrémités	sommet des murs OU aboutements	Element	300	Derived	étude géométrie
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
		éléments structuraux supportés	plancher OU toit	Element	300	?	Demande une étude structurale
		intérieur/extérieur		boolean	200	Derived	étude spatiale
Area	aire communicante	distance de la limite de propriété		double	300	Add	étude spatiale
		revêtement		Material	300	Built-in	
		protection par gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs-protection
		issues associées		Area/Room/D	300	Derived	étude spatiale
Équipement	appareil à combustion	étage		Level	200	Automatic	
		intérieur/extérieur		boolean	200	Derived	étude spatiale
		distance de la limite de propriété		double	350	Add	
		position		Room	300	Derived	étude spatiale
		pièces desservies		Room	350	Derived	étude spatiale
		incinérateur		boolean	300	Add	
Équipement	ascenseur	largeur intérieure		double	?		
		longueur intérieure		double	?		
		desservit chaque étage		boolean	?		
		parois associés		Element	?		
		plancher associé		Element	?		
		plafonds associés		Element	?		
Équipement	appareil d'éclairage	matériau		Material	300	Built-in	
		position		Room	300	Derived	étude spatiale
		intérieur/extérieur		boolean	200	Derived	étude spatiale
		distance de la limite de propriété		double	300	Add	étude spatiale
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
Canopy	auvent	profondeur		double	200	Automatic	
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
		ouverture associée		Element	350	Derived	étude géométrie
		angle avec mur adjacent		double	300	?	

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Équipement électrique	boîte de sortie électrique	matériau		Material	300 Built-in		
		séparation coupe-feu associée		Element	350 Derived		étude spatiale
Glass Gazing	briques de verre	fonction de registre coupe-feu		boolean	300 Add		
		joint horizontal	armatures en acier	String list	400 ?		
		surface maximale		double	300 Derived		étude géométrie
		position/ ouverture associée		Element	300 Derived		étude spatiale
Room	balcon	accès direct		Door	350 Derived		étude géométrie
		profondeur		double	200 Automatic		
		surface		double	200 Automatic		
		nombre de personne prévu		integer	300 Add		
		élévation		double	200 Automatic		
		fonction d'issue		boolean	300 Add		
Room	buanderie	position à l'extérieur d'un logement		boolean	300 Derived		étude spatiale
		séparations coupe-feu associées		Element	350 Derived		étude géométrie
		protection par gicleurs		boolean	350 Derived		Gicleurs-position
Bâtiment	bâtiment	classe		String	200 Add		
		usage principal	C,D	String	100 Built-in		
		usage occasionnel	A2,E	String	100 Add		
		hauteur		double	300 Automatic		
		nombre d'étage		integer	200 Derived		Compteur étages
		aire		double	200 Automatic		
		nombre de logements		integer	200 Derived		Compteur pièces avec nom Logement
		construction combustible		boolean	300 Derived		Elements structuraux-Matériau
		nombre de suites		integer	200 Derived		Compteur pièces avec nom Suite si présence de suite qui ne sont pas des logements
		protection gicleurs		boolean	350 Derived		Gicleurs-position
	câbles de fibre optiques	matériau de l'enveloppe		Material			
		indice de propagation de la flamme		integer			
		position	canalisation incombustibles totalements	String			
		type de transmission	voix OU son OU données	String			
		pièce desservie		Room			
		séparation coupe feu pénétrée		Element			
	câbles électriques	matériau de l'enveloppe		Material			
		diamètre		double			
		indice de propagation de la flamme		integer			
		position	canalisation incombustibles totalements	String			
		groupés OU individuels		String			
		espacement		double			
		séparation coupe feu pénétrée		Element			
		type de transmission	voix OU son OU données OU signaux d'alarme	String			
		position		boolean			
		épaisseur		double			
Room	chambre d'équipement électrique	système d'extinction automatique		Element	300 Derived		Gicleurs-position
		liquide diélectrique		boolean	350 Add		
		dispositif de dégagement/événements		Element	350 Derived		!
Canalisation	canalisation	totalément fermée		boolean	350 Derived		étude géométrie
		matériau		Material	300 Built-in		
		position	plénium	Room	300 Derived		étude spatiale
		diamètre		double	300 Automatic		
		fonction	protection incendie OU fonctionnement de	String	300 Built-in		

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Room	comble	murs associés	mur extérieur OU mur intérieur	Element	300	Derived	étude géométrie
		partagé entre habitations		boolean	300	Add	
		fonction de vide sous toit		boolean	400	Add	
		position	façade de rayonnement OU mur	Element/Geo	350	Derived	étude géométrie
		protection par gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs-position
Area	compartiment	protection par les gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs-position
		séparations coupe-feu associées		Element	300	Derived	étude géométrie
		ventilateurs individuels		Element	300	Derived	étude géométrie
		surface		double	200	Automatic	
Gaine	conduit	appareils raccordés	équipement de cuisson commerc	Sting list	350	Derived	étude géométrie
		classification du système	extraction d'air OU reprise OU so	String	300	Built-in	
		compartiments associés		Area	300	Derived	étude géométrie
		élément au débouché d'une gaine		Element	350	Derived	étude géométrie
		flux d'air ascendant		String	350	Add	
		fonction	protection incendie	String	300	Add	
		matériau		Material	300	Built-in	
		parcours vertical/horizontal		String	300	Derived	étude géométrie
		point de fusion supérieur		integer	300	Add	
		température maximale		double	300	Add	
		position	vide technique	Room	300	Derived	étude spatiale
		pression négative à l'intérieur		boolean	300	Add	
		prolongement	toit	Level	300	Automatic	
		registre coupe-feu associé		String	350	Derived	étude géométrie
section		Double	300	Automatic			
Sol	couverture de plancher	séparation coupe-feu pénétrée		Element	300	Derived	étude géométrie
		plancher associé		Element	350	Derived	étude géométrie
		matériau	OSB OU contreplaque ET/OU liant	Material	300	Built-in	
		épaisseur		double	300	Automatic	
Other	contenaire	type d'assemblage	rainure et languette	String	400	Add	
		dispositif associé	descente de vide-ordures			Add	
		protection par gicleurs		boolean		Derived	Gicleurs -position
	cours intérieure	séparations coupe-feu associé				Derived	étude géométrie
		porte d'issue associée		Element		Derived	étude spatiale
Room	construction hors toit	moyen d'évacuation associé		Room		Derived	étude spatiale
		étage	toit	Level	200	Automatic	
Room	corridor commun	accès à l'issue associé		Room	300	Derived	étude spatiale
		fonction d'issue		boolean	300	Add	
		issues associées		Room	350	Derived	Porte - espace 1 et 2
		séparations coupe-feu associées		Element	350	Derived	étude géométrie
		largeur		double	200	Automatic	
		longueur		double	200	Automatic	
		pièces desservies associée		Room	350	Derived	étude spatiale
en impasse		boolean	350	Add			
revêtements intérieur		Material	350	Derived	étude géométrie		
étage		Level	200	Automatic			
capacité cumulative		double	300	Add			
		pièce de débouchement		Room	350	Derived	!

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Other	descente de linge	étanche à l'humidité		boolean	400	Add	
		type de surface intérieure	lisse	Material	300	Deried	Materiau- rugosité
		protection contre la corrosion		boolean	300	Add	
		matériau		Material	300	Built-in	
		gaine associée		Room	350	Derived	étude spatiale
		hauteur de prolongement au dessus du toit		double	200	Derived	étude géométrie
		ouvertures de ventilation		Element	350	Derived	Ouvertures-position
		section		double	200	Automatic	
		position		Geometry	200	Derived	étude spatiale
		gicleurs au sommet		boolean	350	Derived	Gicleurs-position
		Other	descente de vide-ordures	étanche à l'humidité		boolean	400
type de surface intérieure	lisse			Material	300	Derived	Materiau- rugosité
protection contre la corrosion				boolean	300	Add	
matériau				Material	300	Built-in	
gaine associée				Room	350	Derived	étude spatiale
hauteur de prolongement au dessus du toit				double	200	Derived	étude géométrie
ouvertures de ventilation				Element	350	Derived	Ouvertures-position
section				double	200	Automatic	
position				Geometry	200	Derived	étude spatiale
gicleurs au sommet				boolean	350	Derived	Gicleurs-position
Other	dispositif thermosensible			installation de nettoyage au sommet		boolean	300
		position	capter la hausse anormale de tem	Geometry	300		
		conduit associé		Element			
		seuil de déclenchement	température maximale + 30°C	double			
Other	Volet	degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
		séparation coupe-feu associée		Element	350	Derived	étude géométrie
		ouverture associée		Element	200	Derived	étude géométrie
		matériau	verre armé OU briques de verre	Material	300	Built-in	
		dispositif de fermeture	enclenchement automatique OU	String	300	Add	
Bouche d'aéra	diffuseur	Nom	Diffuseur OU bouche d'aération	String	200	Built-in	
		matériau		Material	300	Built-in	
		position (pièce)		Room	300	Derived	étude spatiale
		séparation coupe-feu associée		Element	350	Derived	étude géométrie
		fonction	protection des ouvertures	String	300	Derived	étude géométrie
		ouverture associée		Element	300	Derived	étude géométrie
Roof	dalle de toit	élément de support		Element	350	Derived	étude géométrie
		type de joint à la jonction avec autre élér	joint étanche au feu	String	400	Add	!
		éléments à la jonction	séparation coupe-feu OU planche	Element	350	Derived	étude géométrie
		matériau	béton	Material	300	Built-in	
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
		vide de construction au-dessus		boolean	350	Derived	étude spatiale
fonction de séparation coupe-feu		boolean	300	Derived	étude géométrie		

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributs	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
	élément en saillie						
		category		Element	300	Automatic	toit/plancher/etc
		matériau		Material	300	Built-in	
		élément par rapport auquel il est en saillie	mur coupe-feu	Element	350	Derived	étude géométrie
Équipement	équipement						
		local technique associé		Room	300	Derived	étude spatiale
		point d'éclair du liquide	93,3°C	double	400	Add	
		risque d'explosion		boolean	300	Add	
Room	escalier						
		fonction d'issue		boolean	300	Add	
		intérieur/extérieur		String	200	Derived	étude spatiale
		menuiserie contenue		Element	350	Derived	étude spatiale
		séparations coupe-feu associées		Element	350	Derived	étude géométrie
		plafonds associés		Element	350	Derived	étude géométrie
		portes associées		Element	350	Derived	étude géométrie
		paliers protégés par les gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs -position
		escalier en ciseaux		boolean	300	Add	
		hauteur de prolongement au dessus du toit		double	200	Derived	étude géométrie
		étage		Level	200	Automatic	
		capacité cumulative		double	300	Add	
		pièce de débouchement		Room	350	Derived	!
Équipement	groupe électrogène						
		alimentation de secours-incendie		boolean	300	Add	
		position (pièce)		Room	300	Derived	étude spatiale
Window	fenêtre						
		position (façade)		Element	350	Derived	étude spatiale
		protection associée	brique de verre OU verre armé O	Material/Elem	350	Derived	étude spatiale
		fonction de baie non protégée		boolean	350	Derived	étude spatiale
		matériau		Material	300	Built-in	
		mur d'installation associé		Element	350	Derived	étude géométrie
		fonction de registre coupe-feu		boolean	300	Add	
Roof framing	ferme						
		matériau	gros bois d'œuvre	Material	300	Built-in	
		épaisseur		double	300	Automatic	
		largeur		double	300	Automatic	
Wall	façade						
		surface de rayonnement		Geometry	300	Derived	étude géométrie
		distance limitative		Double	300	Add	
		ouverture associée		Element	300	Derived	étude géométrie
		revêtement extérieur		Material	300	Add	
		surface baie non protégée		Double	200	Derived	Ouverture associée-sur
		espace associé	compartiment OU garage de stati	Room	300	Derived	étude spatiale
		donnant sur une rue		boolean	200	Add	
		degré de résistance au feu		Integer	300	Built-in	
		élément porteur		boolean	300	Built-in	
		angle avec autre façade		double	200	Derived	étude géométrie

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
gard-corps	garde-corps	hauteur		double	200	Automatic	
		espacement entre les barres de remplissage		double	300	Add	
		espace associé	balcon OU escalier...	Element	350	Derived	étude spatiale
Room	garage de stationnement	toit associé		Element	300	Derived	étude spatiale
		séparation coupe feu associée		Element	350	Derived	étude spatiale
		étage ouvert		boolean	300	?	
Room	gaine d'ascenseur	contenu	ascenseur OU petit monte-charge	String list	200	Derived	Room-name
		installations techniques	descentes de linge ET/OU vide-o	Element list	350	Derived	étude géométrie
		horizontal OU vertical		String	200	Derived	étude géométrie
		traverse	toit OU séparation coupe-feu	Element	350	Derived	étude géométrie
		prolongement dans	vide technique horizontal OU vid	String list	300	Derived	étude spatiale
		séparations coupe-feu associées		Element	300	Derived	étude géométrie
		gaines adjacentes		Element	300	Derived	étude spatiale
		destiné aux pompiers		boolean	300	Add	
Room	gaine technique	installations techniques	descentes de linge ET/OU vide-o	Element list	350	Derived	étude géométrie
		horizontal OU vertical		String	200	Derived	étude géométrie
		traverse	toit OU séparation coupe-feu	Element	350	Derived	étude géométrie
		prolongement dans	vide technique horizontal OU vid	String list	300	Derived	étude spatiale
		séparations coupe-feu associées		Element	300	Derived	étude géométrie
		gaines adjacentes		Element	300	Derived	étude spatiale
Sprinklers	gicleurs	position		Gometry	300	Derived	étude géométrie
		pénétration associée		Opening	350	Derived	étude spatiale
Equipement	générateur d'air chaud	position (pièce)		Room	300	Derived	étude spatiale
		à combustible		boolean	350	Add	
Distribution C	Grille	fonction	protection des ouvertures	String	300	Derived	étude géométrie
		séparation coupe-feu associée		Element	350	Derived	étude géométrie
		matériau		Material	300	Built-in	

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Équipement	machinerie de l'ascenseur						
	manceuvre de porte	position (pièce)		Room	300	Derived	étude spatiale
Beam	madrier						
		épaisseur		Double	300	Automatic	
		assemblage	à rainure et languette OU à rainure	String list	400	Add	!
derived	mezzanine						
		élévation		double	200	Automatic	
		considéré comme étage		boolean	200	Add	
		se termine à la séparation coupe-feu		boolean	300	Derived	étude géométrie
		surface		double	200	Automatic	
Material	matériaux de construction						
		Nom	fibres semi-rigides OU verre, OU r	String	200	Automatic	
		fonction d'isolant		boolean	300	Add	
		combustible OU incombustible		String	300	Input	fixé par la norme
		exposition		boolean	300	Derived	!
		indice de propagation de la flamme		integer	300	Input	
		indice de dégagement des fumées		integer	300	Input	
		point de fusion		integer	300	Add	
		produit d'étanchéité		boolean	300	Add	
		surface maximale		double	300	Derived	étude géométrie
		augmentation de la température		double	300	Add	
		impregnation sous pression	substances chimiques ignifugean	String	300	Add	
		exposition si coupe		boolean	350	?	
		position	vide de construction OU vide tech	Room/Area	300	Derived	étude spatiale
		épaisseur		double	400	Automatic	
		revêtement	béton OU maçonnerie OU matériau incombustible		350	Add	
		élément associé		Element	350	Derived	étude géométrie
Wall	mur						
		fonction de protection incendie	séparation coupe-feu OU mur coupe-feu		300	Derived	étude spatiale
		revêtement de finition		Material	300	Add	
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
		éléments structuraux supportés		Element	350	Derived	étude géométrie
		élément continu		boolean	350	Derived	étude géométrie
		contact avec des éléments d'ossature		boolean	350	Derived	étude géométrie
		départ	sol OU plancher au-dessus du gar	Element	300	Automatic	
		limite supérieure	sous-face dalle de toit	Element	300	Automatic	
		surélévation		double	300	Derived	étude géométrie
		fonction de mur mitoyen		boolean	350	Derived	étude spatiale
		dimensions		double	300	Automatic	
		intérieur/extérieur		String	200	Derived	étude spatiale
		distance limitative		integer	200	Derived	étude spatiale
		éléments à la jonction	séparation coupe-feu OU planche	Element	350	Derived	étude géométrie
		surface		double	200	Derived	étude géométrie
		séparation d'usages		boolean	300	Derived	étude spatiale
		espace 1	corridor commun OU issue	String	350	Derived	étude spatiale
		espace 2	suite OU pièces contiguës de dor	String	350	Derived	étude spatiale
		ouverture associée		boolean	350	Derived	étude spatiale
		matériau	maçonnerie OU béton ET/OU isol	Material	300	Built-in	
		élément pénétrant associé		boolean	300	Derived	étude spatiale
		isolation séparation coupe-feu exigée		boolean	400	Add	
		liaison avec mur coupe-feu		boolean	350	Derived	étude géométrie
		indépendance de l'effondrement sur le mur		boolean	350	?	Demande une étude st
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributs	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Beam	poutre	matériau	construction en gros bois d'œuvre	Material	300 Built-in		
		épaisseur		double	350 Automatic		
		pénétration dans la maçonnerie		boolean	350 Derived		étude spatiale
		interface maçonnerie/poutres	plaques d'assise OU boîtiers à aut	String list	400 Add		
		fonction structurale	maîtresse OU intermédiaire	String list	350 Add		
		éléments structuraux supportés	plancher OU toit	Element	350 Derived		étude spatiale
		repose sur	étrier métallique OU poutre maît	String list	350 Derived		!
		étage		Level	300 Automatic		
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
		largeur			350 Automatic		
		position extérieur/intérieur		boolean	300 Derived		étude spatiale
		distance de la limite de propriété		Double	300 Add		
		revêtement		Material	300 Add		
		liaison avec mur coupe-feu		boolean	350 Derived		étude géométrie
		indépendance de l'effondrement sur le mur		boolean	350 ?		Demande une étude st
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
Column	poteau	matériau		Material	300 Built-in		
		seul pièce OU superposé		boolean	350 Derived		étude géométrie
		assemblage de poteaux superposés	chapiteaux en béton armé OU cha	String list	400 Add		
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
		éléments structuraux supportés	plancher OU toit	Elements	300 ?		Demande une étude st
		position extérieur/intérieur		boolean	300 Derived		étude géométrie
		distance de la limite de propriété		Double	300 Add		
		revêtement		Material	300 Add		
		dimensions		double	350 Automatic		
		liaison avec mur coupe-feu		boolean	350 Derived		étude géométrie
		indépendance de l'effondrement sur le mur		boolean	350 ?		Demande une étude st
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
Door	porte	position (facade)		Element	350 Derived		étude spatiale
		fonction de baie non protégée		boolean	350 Derived		étude spatiale
		position extérieur/intérieur			300 Derived		Porte-position
		degré pare-flammes		integer	300 Built-in		
		fonction de dispositif d'obturation		boolean	350 Derived		séparation coupe-feu a
		séparation coupe-feu associée		Element	350 Derived		étude spatiale
		jeu à la base		double	400 Add		!
		jeu sur les côtés		double	400 Add		!
		matériau		Material	300 Built-in		
		intérieur logement /sortie de logement		String	300 Derived		étude spatiale
		porte d'issue		boolean	300 Built-in		
		élévation		Double	300 Automatic		
		étage		Level	300 Automatic		
		fermeture automatique	après chaque utilisation OU cond	String list	300 Add/Built-in		le ifc param is a boolean
		espace 1	corridor commun OU passage ext	String list	300 Derived		étude spatiale
		espace 2	pièces adjacente	String list	300 Derived		étude spatiale
		dispositif de relâchement	dispositif thermosensible	String	400 Add		!
		température maximale		integer	400 Add		
		garniture d'étanchéité		Material	300 Add		
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
séparation coupe-feu associée		Element	350 Derived		étude géométrie		
ouverture associée		Element	200 Derived		étude géométrie		
		dispositif de fermeture		String	300 Add		
Roof	platelage de toit	protection par gideurs		boolean	300 Derived		Gicleurs-position
		type de joint à la jonction avec autre élér	joint étanche au feu	String	400 Add		!
		supports	bois ignifugé OU construction en	Element	350 Derived		étude spatiale
		couverture	plaque de plâtre OU barrière ther	Material	350 Derived	Material-position	
	pièce de fixation	matériau		Material	300 ?		
		réseau de conduit associé		Element	350 ?		
Duct	plénum	matériau de revêtement intérieur		Material	350 Derived		!
		matériau de revêtement extérieur		Material	350 Derived		!
		présence de mousse plastique		boolean	350 Derived		étude spatiale
		fonction	reprise d'air OU générateur d'air	String	300 Built-in		
		dégagement		double	300 Derived		étude spatiale
Room	plate-forme	moyen d'évacuation associé		Element	300 Derived		Porte-position
Room	passage extérieur	moyen d'évacuation associé		Element	350 Derived		Porte-position
		suites desservies		Area	350 Derived		étude spatiale
		revêtement de finition		Material	350 Derived		étude spatiale
		soffite		Geometry	300 Derived		étude spatiale
		garde-corps		Element	350 Derived		étude spatiale
		surface du côté extérieur		Geometry	200 Derived		étude spatiale
		escalier d'issue à chaque extrémité		boolean	300 Derived		étude spatiale

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Column	poteau	matériau		Material	300	Built-in	
		seul pièce OU superposé		boolean	350	Derived	étude géométrie
		assemblage de poteaux superposés	chapiteaux en béton armé OU ch	String list	400	Add	
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
		éléments structuraux supportés	plancher OU toit	Elements	300	?	Demande une étude st
		position extérieur/intérieur		boolean	300	Derived	étude géométrie
		distance de la limite de propriété		Double	300	Add	
		revêtement		Material	300	Add	
		dimensions		double	350	Automatic	
		liaison avec mur coupe-feu		boolean	350	Derived	étude géométrie
		indépendance de l'effondrement sur le mur		boolean	350	?	Demande une étude st
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
Door	porte						
		position (facade)		Element	350	Derived	étude spatiale
		fonction de baie non protégée		boolean	350	Derived	étude spatiale
		position extérieur/intérieur			300	Derived	Porte-position
		degré pare-flammes		integer	300	Built-in	
		fonction de dispositif d'obturation		boolean	350	Derived	séparation coupe-feu a
		séparation coupe-feu associée		Element	350	Derived	étude spatiale
		jeu à la base		double	400	Add	!
		jeu sur les côtés		double	400	Add	!
		matériau		Material	300	Built-in	
		intérieur logement / sortie de logement		String	300	Derived	étude spatiale
		porte d'issue		boolean	300	Built-in	
		élévation		Double	300	Automatic	
		étage		Level	300	Automatic	
		fermeture automatique	après chaque utilisation OU condi	String list	300	Add/Built-in	le ifc param is a boolean
		espace 1	corridor commun OU passage ext	String list	300	Derived	étude spatiale
		espace 2	pièces adjacente	String list	300	Derived	étude spatiale
		dispositif de relâchement	dispositif thermosensible	String	400	Add	!
		température maximale		integer	400	Add	
		garniture d'étanchéité		Material	300	Add	
		degré de résistance au feu		integer	300	Built-in	
		séparation coupe-feu associée		Element	350	Derived	étude géométrie
		ouverture associée		Element	200	Derived	étude géométrie
		dispositif de fermeture	enclenchement automatique OU	String	300	Add	
Roof	platalage de toit						
		protection par gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs-position
		type de joint à la jonction avec autre élér	joint étanche au feu	String	400	Add	!
		supports	bois ignifugé OU construction en	Element	350	Derived	étude spatiale
		couverture	plaque de plâtre OU barrière ther	Material	350	Derived	Material-position
	pièce de fixation						
		matériau		Material	300	?	
		réseau de conduit associé		Element	350	?	
Duct	plénum						
		matériau de revêtement intérieur		Material	350	Derived	!
		matériau de revêtement extérieur		Material	350	Derived	!
		présence de mousse plastique		boolean	350	Derived	étude spatiale
		fonction	reprise d'air OU générateur d'air	String	300	Built-in	
		dégagement		double	300	Derived	étude spatiale
Room	plate-forme						
		moyen d'évacuation associé		Element	300	Derived	Porte-position
Room	passage extérieur						
		moyen d'évacuation associé		Element	350	Derived	Porte-position
		suites desservies		Area	350	Derived	étude spatiale
		revêtement de finition		Material	350	Derived	étude spatiale
		soffite		Geometry	300	Derived	étude spatiale
		garde-corps		Element	350	Derived	étude spatiale
		surface du côté extérieur		Geometry	200	Derived	étude spatiale
		escalier d'issue à chaque extrémité		boolean	300	Derived	étude spatiale

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	objet	attributs	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Column	poteau	matériau		Material	300 Built-in		
		seul pièce OU superposé		boolean	350 Derived		étude géométrie
		assemblage de poteaux superposés	chapiteaux en béton armé OU ch	String list	400 Add		
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
		éléments structuraux supportés	plancher OU toit	Elements	300 ?		Demande une étude st
		position extérieur/intérieur		boolean	300 Derived		étude géométrie
		distance de la limite de propriété		Double	300 Add		
		revêtement		Material	300 Add		
		dimensions		double	350 Automatic		
		liaison avec mur coupe-feu		boolean	350 Derived		étude géométrie
		indépendance de l'effondrement sur le mur		boolean	350 ?		Demande une étude st
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
Door	porte	position (facade)		Element	350 Derived		étude spatiale
		fonction de baie non protégée		boolean	350 Derived		étude spatiale
		position extérieur/intérieur			300 Derived		Porte-position
		degré pare-flammes		integer	300 Built-in		
		fonction de dispositif d'obturation		boolean	350 Derived		séparation coupe-feu a
		séparation coupe-feu associée		Element	350 Derived		étude spatiale
		jeu à la base		double	400 Add		!
		jeu sur les côtés		double	400 Add		!
		matériau		Material	300 Built-in		
		intérieur logement /sortie de logement		String	300 Derived		étude spatiale
		porte d'issue		boolean	300 Built-in		
		élévation		Double	300 Automatic		
		étage		Level	300 Automatic		
		fermeture automatique	après chaque utilisation OU cond	String list	300 Add/Built-in		le ifc param is a boolean
		espace 1	corridor commun OU passage ext	String list	300 Derived		étude spatiale
		espace 2	pièces adjacente	String list	300 Derived		étude spatiale
		dispositif de relâchement	dispositif thermosensible	String	400 Add		!
		température maximale		integer	400 Add		
		garniture d'étanchéité		Material	300 Add		
		degré de résistance au feu		integer	300 Built-in		
		séparation coupe-feu associée		Element	350 Derived		étude géométrie
		ouverture associée		Element	200 Derived		étude géométrie
		dispositif de fermeture	enclenchement automatique OU	String	300 Add		
Roof	platelage de toit	protection par gicleurs		boolean	300 Derived		Gicleurs-position
		type de joint à la jonction avec autre élé	joint étanche au feu	String	400 Add		!
		supports	bois ignifugé OU construction en	Element	350 Derived		étude spatiale
		couverture	plaque de plâtre OU barrière ther	Material	350 Derived		Material-position
	pièce de fixation	matériau		Material	300 ?		
		réseau de conduit associé		Element	350 ?		
Duct	plénum	matériau de revêtement intérieur		Material	350 Derived		!
		matériau de revêtement extérieur		Material	350 Derived		!
		présence de mousse plastique		boolean	350 Derived		étude spatiale
		fonction	reprise d'air OU générateur d'air	String	300 Built-in		
		dégagement		double	300 Derived		étude spatiale
Room	plate-forme	moyen d'évacuation associé		Element	300 Derived		Porte-position
Room	passage extérieur	moyen d'évacuation associé		Element	350 Derived		Porte-position
		suites desservies		Area	350 Derived		étude spatiale
		revêtement de finition		Material	350 Derived		étude spatiale
		soffite		Geometry	300 Derived		étude spatiale
		garde-corps		Element	350 Derived		étude spatiale
		surface du côté extérieur		Geometry	200 Derived		étude spatiale
		escalier d'issue à chaque extrémité		boolean	300 Derived		étude spatiale

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributes	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Access ramp	rampe	penne		Double	300	Built-in	
		nombre de personne prévu		Integer	300	Add	
		largeur		Double	300	Automatic	
		accès à l'issue		boolean	300	Derived	étude spatiale
Duct	réseau de conduit d'air	température de l'air maximale			300	Built-in	
		matériau de revêtement intérieur			350	Built-in	
		matériau de revêtement extérieur			350	Built-in	
		parcours vertical/horizontal	vertical OU horizontal	String list	300	Derived	étude géométrie
Connector	raccord	matériau		Material	300	Built-in	
		réseau de conduit d'air associé		Element	350	Derived	étude géométrie
		lieu d'installation		Geometry	300	Derived	étude spatiale
		séparation coupe-feu pénétrée		Element	300	Derived	étude géométrie
Duct accessory	registre coupe-feu	longueur		Double	300	Automatic	
		degré pare-flammes		integer	300	Built-in	
		dispositif de fermeture automatique	rupture d'un maillon fusible OU d	String list	300	Built-in	
		plan d'installation associé	séparation coupe-feu	Element	300	Derived	étude géométrie
		conduit associé		Element	350	Derived	étude géométrie
		indépendance sur l'effondrement du conduit		boolean	?		
		trappe d'accès jointive associée		boolean	?		
derived	revêtement extérieur	ouverture associée		Element	200	Derived	étude géométrie
		matériau	verre armé OU briques de verre	Material	300	Built-in	
		dispositif de fermeture	enclenchement automatique OU	String	300	Add	
		surface		Double	200	Derived	Dimensions
Wall	revêtement	matériau		Material	300	Built-in	
		épaisseur fourrure		Double	300	Add	
		épaisseur		Double	300	Automatic	
		pièces de fixation, joints		Element	400	?	
		endroits renforcés			?		
Wall	revêtement	élément associé		Element	350	Derived	!
		orientation vers	vide de construction	String	350	Derived	!
		matériau		Material	300	Built-in	

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	object	attributs	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
	suspentes des parois de faux-plafond						
Room	salle de bain	matériau		Material	300	Built-in	
		revêtement de finition		Material	300	Derived	étude murs de séparati
Floor	sol	matériau de revêtement		Material	300	Built-in	
Area	sous-sol	protection par gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs-position
		séparation coupe-feu associée		Element	300	Derived	Murs-position
		étage ouvert		boolean	300	Add	
		hauteur libre		Double	300	Derived	étude géométrie
		usage		String	300	Add	
derived-Roof	soffite de toit						
		en saillie		boolean	300	Derived	étude de géométrie : ir
		position		Geometry	300	Derived	étude spatiale
		sous-face		Geometry	300	Derived	étude géométrie
		ouverture associée		Element	350	Derived	étude spatiale
		revêtement	tôle d'acier OU plaques de plâtre	Material	300	Built-in	
		élévation		Double	200	Derived	étude spatiale
		distance de la limite de propriété		double	200	Add	!
		distance d'un autre bâtiment		double	200	Add	!
other	seuil						
		matériau		Material	300	Built-in	
Area	suite						
		fonction	habitation OU établissement d'af	String	300	Add	
		deservi par corridor commun		boolean	300	Derived	Porte-espace1 et espac
		pièces associées		Element	300	Derived	étude spatiale
		porte de sortie associée		Element	300	Derived	étude spatiale
		nombre de personnes prévues		Integer	350	Input	
		surface		Double	200	Automatic	
		dimension diagonale maximale de l'aire		Double	300	Derived	étude géométrie
		distance de parcours maximale		Double	300	Derived	étude spatiale
		séparation coupe-feu associée		Element	350	Derived	étude spatiale
		revêtement de finition		Element	300	Derived	étude spatiale
derived	support de platelage						
		matériau	bois ignifugé OU construction en	Material	300	Built-in	
derived	supports de couverture						
		matériau	contreplaqué OU bois lamelé-col	Material	300	Built-in	
		assemblage	liant phénolique OU rainure et la	String list	400	Add	
		épaisseur		double	300	Automatic	
		protection par les gicleurs		boolean	350	Derived	étude spatiale
Canalisation	tuyau						
		fonction	gicleurs OU alimentation en eau	String list	300	Built-in	
		protection coupe-feu associé		Element	300	Derived	Registre coupe-feu - po
		position	vide technique vertical	Room	300	Derived	étude spatiale
		séparation coupe-feu pénétrée		Element	350	Derived	étude géométrie
		matériau		Material	300	Built-in	
Roof	toit						
		élévation de la surface		double	200	Derived	étude géométrie
		continuité		boolean	300	Derived	étude géométrie
		mur coup-feu en dessous		boolean	350	Derived	étude spatiale
		matériau	métallique OU bois ignifugé	Material	300	Built-in	
		degré de résistance au feu		Integer	300	Built-in	
		fonction de séparation coupe-feu		boolean	300	Derived	étude spatiale
Room	toit						
		nombre de personnes prévues		Integer	300	Add	
		usage		String	300	Add	
		moyen d'évacuation associé		Element	350	Derived	étude spatiale
		accessibilité escalier d'issue		boolean	350	Derived	Toit-moyen d'évacuati
		protection par les gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs-position
Room	terrasse						
		moyen d'évacuation associé		Element	300	Derived	étude spatiale

Tableau-A III-1 Model Attribute Table (suite)

Category	objet	attributs	expected values	data type	LOD	Parameter type	Moyen de dérivation
Curtain-wall	vitrage	matériau		Material	300	Built-in	
Room	voie de passage pour véhicule	toit associé		Element	300	Derived	étude spatiale
		séparations coupe-feu		Element	300	Derived	étude spatiale
		fonction	chargement ou déchargement de	String	400	Add	
		combustible/incombustible		boolean	300	Derived	étude des matériaux de
		étage		Level	200	Automatic	
Room	vides sanitaires	position	sous toit OU mur intérieur OU pla	String list	300	Derived	étude spatiale
		séparations coupe-feu associée		Element	350	Derived	étude spatiale
		espaces adjacents	combles OU vides sous toit OU vic	Room	300	Derived	étude spatiale
		protection par les gicleurs		boolean	300	Derived	Gicleurs-position
		étage	sous-sol	Level	200	Automatic	
		surface		Double	200	Automatic	
		dimension maximale		Double	30	Derived	Dimension du plancher
		hauteur libre		Double	300	Automatic	
		usage		String	300	Add	
		passage tuyaux de raccordement		Element	300	Derived	Tuyaux-position
		fonction de plénum		boolean	300	Add	
		plancher au dessus		Element	350	Derived	étude géométrie
		ouverture		boolean	350	Derived	étude géométrie
	vides de construction	éléments au-dessus	plancher OU plafond OU toit	String list			
		éléments en dessous	mur OU paroi de gaine verticale C	String list			
		mur associé	mur extérieur OU mur intérieur	String list			
		hauteur		double			
		isolant	pare-feu OU remplissage d'isolan	String list			
		obturation requise		boolean			
		surface		Double			
		horizontal/vertical		String			
		dimension maximale		double			
		fonction	plénum	boolean			
		matériaux à l'intérieur		Material			
Room	vide technique	au-dessus de	séparation coupe-feu vertical OU	Element	300	Derived	étude géométrie
		verticale OU horizontale		String list	200	Derived	étude géométrie
		séparations coupe-feu associées		String list	200	Derived	étude spatiale
		hauteur		Double	300	Automatic	
		plancher au-dessus		Element	300	Derived	étude spatiale
		plancher au-dessous		Element	300	Derived	étude spatiale
		fermeture au sommet		Element	300	?	
		fermeture à sa base		Element	300	?	
		MEP elements passants	tuyaux, conduits, canalisations, c	Element	350	Derived	étude géométrie
		sortie associée		Element	350	Derived	étude géométrie
		surface		double	200	Automatic	
		distance de parcours maximale		double	350	Derived	étude spatiale
		débouche sur une issue		boolean	350	Derived	étude spatiale
	vide de faux-plafond						
		fonction	plénum	string	300	Add	
Room	vestibule	porte associée		Element	300	Derived	étude spatiale
		séparations coupe-feu associées		Element	350	Derived	étude spatiale
		fonction d'issue		boolean	300	Add	
		étage		Level	200	Automatic	
		capacité cumulative		double	350	Add	
		horizontal OU vertical		String	350	Derived	étude spatiale
		séparation coupe-feu associée		Element	300	Derived	étude spatiale
		pièce de débouchement		Room	350	Derived	!
	vidoir (vide-ordure)						
		surface		double	300	Derived	étude géométrie
		dispositif d'obturation	fermeture automatique	String	350	Add	

ANNEXE IV

NŒUD DE CLASSIFICATION D'ÉLÉMENTS PAR COMPARTIMENT SUR UN ÉTAGE

Le nœud de classification des éléments par compartiment est visualisé à la Figure-A II-1, les inputs sont la liste des éléments en question et une liste de booléens. Cette-dernière correspond aux résultats concernant l'intersection de chaque élément avec le volume d'un compartiment donné (Figure-A II-2)

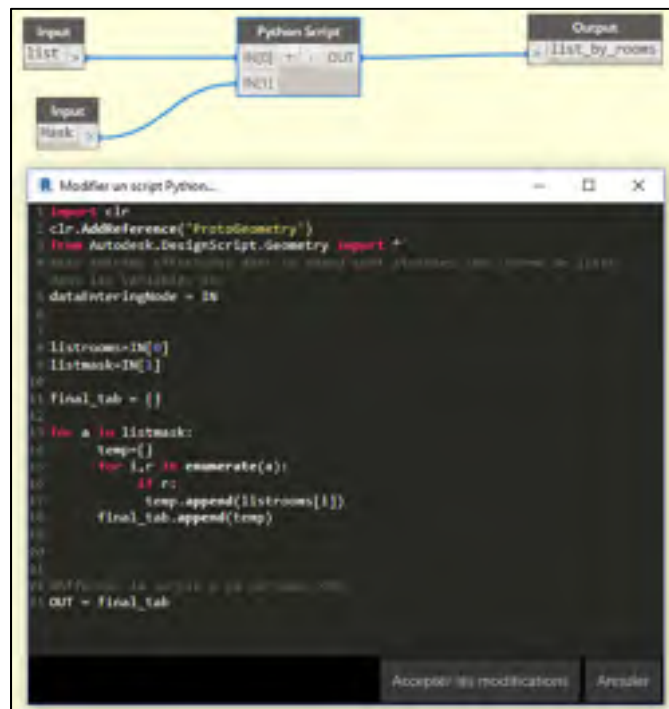


Figure-A IV-1 Python script « FilterMask multiD » du nœud de classification par compartiments

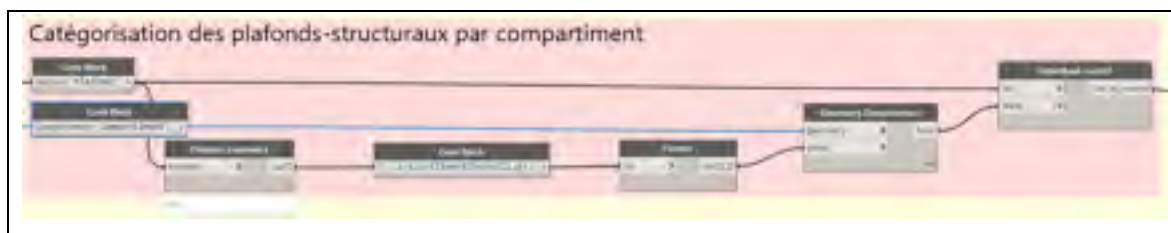


Figure-A IV-2 Exemple d'utilisation du nœud de classification

ANNEXE V

NŒUD DE CLASSIFICATION DES MURS SÉPARATION COUPE-FEU PAR COMPARTIMENT COMPOSÉ DE PLUSIEURS CHAMBRES

```
1 import clr
2 clr.AddReference("ProtoGeometry")
3 from Autodesk.DesignScript.Geometry import *
4 plane = Plane.ByTwoPoints(plane_pt, wall_pt, v_c)
5 dataEnteringNode = IN
6
7 area=IN[0]
8 walls_elements=IN[1]
9 walls_lines=IN[2]
10
11 tolerance=100
12
13
14 tab_final=[]
15 tab2_final=[]
16
17 for contour in area:
18     tab_compartiment=[]
19     tab_how=[]
20     for c,cline in enumerate(contour):
21         ps_c=cline.StartPoint
22         pm_c=cline.PointAtParameter(0.5)
23         pe_c=cline.EndPoint
24         v_c=Vector.ByTwoPoints(ps_c,pe_c).Normalized()
25         plane_c=Plane.ByOriginNormal(pm_c, v_c)
26
27         for i,wline in enumerate(walls_lines):
28             ps_w=wline.StartPoint
29             pe_w=wline.EndPoint
30             v_w=Vector.ByTwoPoints(ps_w,pe_w).Normalized()
31
32             if v_w.IsParallel(v_c):
33                 pp_w=Point.Project(ps_w,plane_c,v_w)
34                 pr_w=Point.Project(ps_w,plane_c,v_w.Reverse())
35                 if len(pp_w)==0:
36                     pp_w=pr_w
37                 d=pp_w[0].DistanceTo(pm_c)
38                 if wline.DoesIntersect(cline):
39                     tab_compartiment.append(walls_elements[i])
40                     tab_how.append("intersect")
41
42                 elif d<tolerance and wline.DistanceTo(
43                     cline.ClosestPointTo(wline))<tolerance:
44                     tab_compartiment.append(walls_elements[i])
45
46     tab_final.append(tab_compartiment)
47
48 return tab_final
```

Figure-A V-1 Python script pour classifier les murs qui ont la fonction de limiter un compartiment de plusieurs pièces sur un étage

ANNEXE VI

NŒUD DE CLASSIFICATION DES ESPACES VERTICAUX PAR COMPARTIMENT

La classification des espaces verticaux concernent les espaces qui traversant plusieurs étages, tel que les gaines d'escaliers, d'ascenseur ou les vides techniques verticaux. Ci-dessous est représenté le script Python qui devait être élaborée pour associer à l'étude géométrique un script de classification d'éléments correspondants en fonction de leur nom.



```
def unclassified(r_names):
    check = False
    for r_name in r_names:
        if isinstance(r_name, str):
            room = unclassified.normalize('MWD', r_name).encode('ASCII',
                'ignore').lower()
            for v in vertical_list:
                if v in room:
                    vertical_tab.append(room)
                    check = True
                    break
            if not check:
                simple_tab.append(room)
                check = False
            else:
                unknown_tab.append(room)
    return vertical_tab, simple_tab, unknown_tab
```

Figure-A VI-1 Python script de classification des éléments de catégorie Pièce en listes de compartiments verticaux correspondants

ANNEXE VII

ORGANISATION DU SCRIPT DE DYNAMO POUR LA VÉRIFICATION DE DEGRÉ DE RÉSISTANCE AU FEU

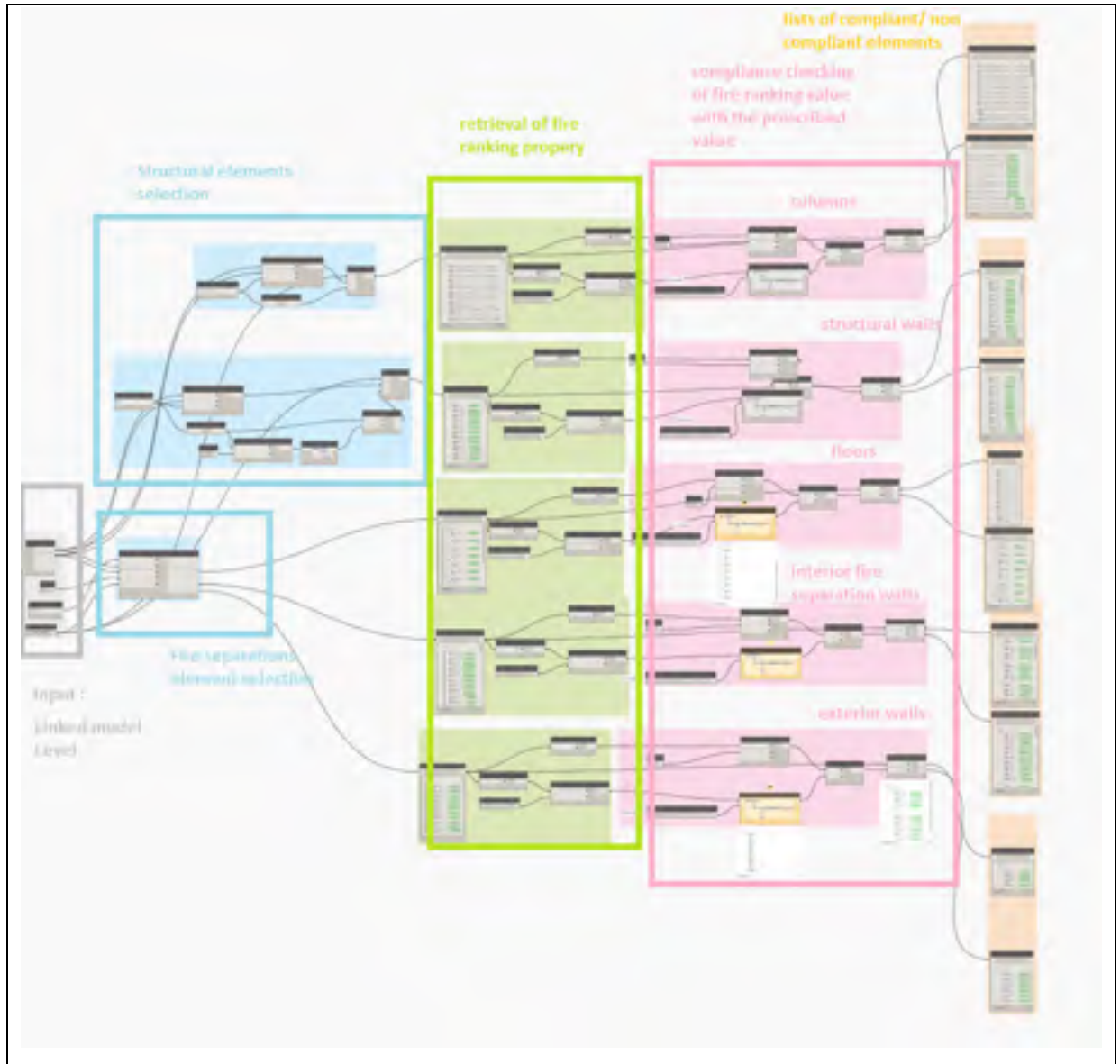


Figure-A VII-1 Structure d'un script Dynamo pour la vérification du degré de résistance au feu pour les séparations coupe-feu horizontales, verticales et autres éléments structuraux avec code couleur correspondant à la Figure 3.3

ANNEXE VIII

ORGANISATION DU SCRIPT DE DYNAMO POUR LA VÉRIFICATION D'INDICE DE PROPAGATION DU FEU

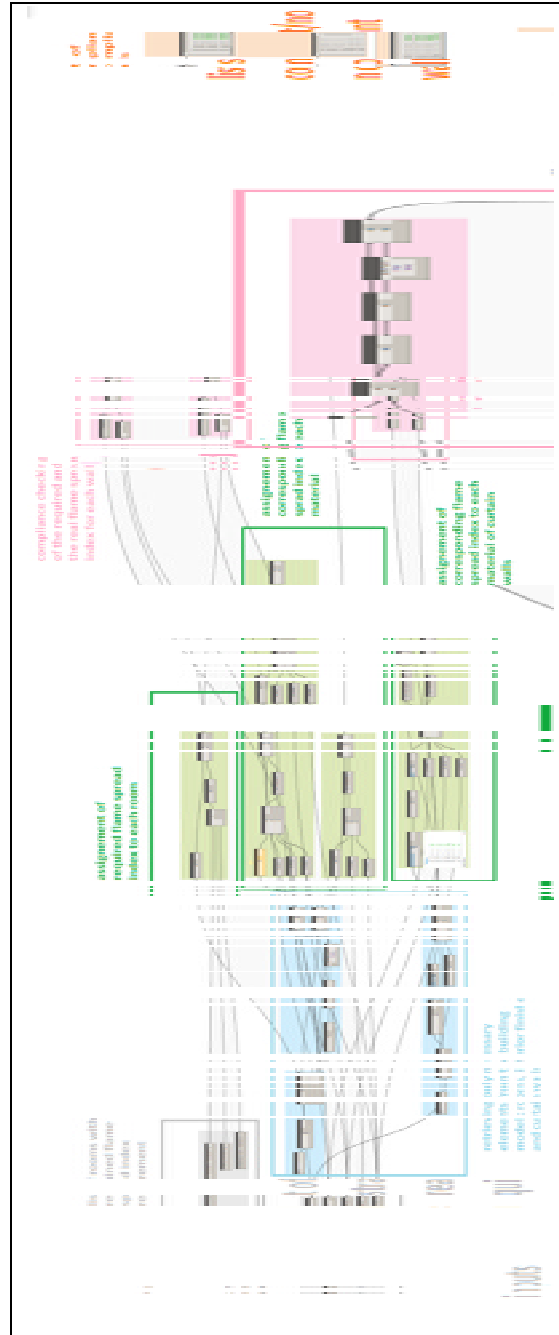


Figure-A VIII-1 Structure d'un script Dynamo pour la vérification d'indice de propagation de la flamme avec le code de couleur correspondant à la Figure 3.3

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Autodesk CFD. (2019). Building HVAC: Software in action. Repéré le 03/04/2019 à <https://www.autodesk.com/solutions/simulation/building-hvac>
- Beach, T. H., Rezgui, Y., Li, H., & Kasim, T. (2015). A rule-based semantic approach for automated regulatory compliance in the construction sector. *Expert Systems with Applications*, 42(12), 5219-5231.
- Belsky, M., Sacks, R., & Brilakis, I. (2016). Semantic enrichment for building information modeling. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(4), 261-274.
- BIMForum. (2013). Level of development specification: For building information models.
- Boton, C., Forgues, D., & Halin, G. (2018). A framework for Building Information Modeling implementation in engineering education. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(10), 866-877.
- Boton, C., Rivest, L., Forgues, D., & Jupp, J. R. (2018). Comparison of shipbuilding and construction industries from the product structure standpoint. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 11(3), 191-220.
- Bowyer, J. L., Shmulsky, R., & Haygreen, J. G. (2007). *Forest products and wood science: an introduction*. Blackwell Publishing.
- British Columbia Laws. (2009). *Wood First Act*. Victoria, British Columbia, Canada: Queen's printer.
- BS EN 1995-1-2:2004. (1995). Eurocode 5: Design of timber structures—General—Common rules and rules for buildings BS EN 1995-1-2: 2004. *Eurocode 5: Design of timber structures—General—Structural fire design*.
- Buchanan, A. H., & Abu, A. K. (2001). *Structural Design for Fire Safety*. Wiley. Repéré à https://books.google.ca/books?id=N_2zDQAAQBAJ
- BuildingSMART. (2012). *An Integrated Process for Delivering IFC Based Data Exchange*. Repéré à http://iug.buildingsmart.org/idms/methods-and-guides/Integrated_IDM-MVD_ProcessFormats_14.pdf/view/

buildingSMART. (2013). Industry Foundation Classes: IFC4 Official Release. Repéré le 03/02/2019

buildingSMART. (2017a). IFC4x1 Final - 2017.06.08 [Official]. Repéré le 21/05/2019 à <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4x1/final/html/>

buildingSMART. (2017b). *Report on Open Standards for Regulations, Requirements and Recommendations Content*

Canadian Wood Council. (1996). *Fire Safety Design in Buildings*. Ottawa, Ontario Canada: Canadian Wood Council.

Code national du bâtiment - Canada, Division B-Partie 3: Protection contre l'incendie, sécurité des occupants et accessibilité (2010).

CYPE. (2012a). *Dynamic fire simulation using the Fire Dynamics Simulator* Repéré à <https://www.youtube.com/watch?v=IyufK9PV77E>

CYPE. (2012b). Dynamic fire simulation using the Fire Dynamics Simulator. Repéré le 08/02/2019 à <http://fds.en.cype.com/>

Dagenais, C., & Desjardins, R. (2012). *Cases studies of performance-based design for mid-rise wood constructions in Quebec (Canada)* (Vol. 2).

Dimyadi, J., & Amor, R. (2013a). Automated building code compliance checking—where is it at. *Proceedings of CIB WBC*, 6.

Dimyadi, J., & Amor, R. (2013b). *Automated building code compliance checking—where is it at* présentée à CIB WBC, Brisbane, Australia.

Dimyadi, J., Amor, R., & Spearpoint, M. (2016). Using BIM to Support Simulation of Compliant Building Evacuation. Dans *11th European Conference on Product and Process Modelling (ECPPM)*. CRC Press.

Dimyadi, J., Solihin, W., & Amor, R. (2018). Using IFC to Support Enclosure Fire Dynamics Simulation. Dans *Advanced Computing Strategies for Engineering. 25th EG-ICE International Workshop 2018, 10-13 June 2018* (Vol. pt.II, pp. 339-360). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-91638-5_19. Repéré à http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-91638-5_19

- Dimyadi, J., Spearpoint, M., & Amor, R. (2008). Sharing building information using the IFC data model for FDS fire simulation. *Fire Safety Science*, 9, 1329-1340.
- Ding, L., Drogemuller, R., Rosenman, M., Marchant, D., & Gero, J. (2006). Automating code checking for building designs – Designcheck. *Clients Driving Innovation: Moving Ideas into Practice*, (CRC for Construction Innovation), 1-16.
- dRofus. (2016). dRofus English Documentation. Repéré le 29/01 à <https://wiki.drofus.com/display/DV/English>
- Eastman, C. (2009). Automated assessment of early concept designs. *Architectural Design*, 79(2), 52-57.
- Eastman, C., Lee, J.-m., Jeong, Y.-s., & Lee, J.-k. (2009). Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in construction*, 18(8), 1011-1033.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- Fast, P. (2016). *Case Study: An 18-storey tall mass timber hybrid student residence at the University of British Columbia*. 22. Internationales Holzbau-Forum IHF 2016.
- Forest Products Laboratory. (1999). Wood Handbook-Wood as an engineering material. *US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, USA. Gen. Tech. Rep. FPLGTR-113*.
- FPInnovations. (2014). *Technical Guide for the Design and Construction of Tall Wood Buildings in Canada*. Vancouver, Canada: FPInnovations.
- Gerard, R., Barber, D., & Wolski, A. (2013). *Fire safety challenges of tall wood buildings*. National Fire Protection Research Foundation.
- Ghannad, P., Lee, Y.-C., Dimyadi, J., & Solihin, W. (2019). Automated BIM data validation integrating open-standard schema with visual programming language. *Advanced Engineering Informatics*, 40, 14-28. doi: 10.1016/j.aei.2019.01.006
- Gosselin, A., Blanchet, P., Lehoux, N., & Cimon, Y. (2016). Main motivations and barriers for using wood in multi-story and non-residential construction projects. *BioResources*, 12(1), 546-570.

- Greenwood, D., Lockley, S., Malsane, S., & Matthews, J. (2010). Automated compliance checking using building information models. Dans *The Construction, Building and Real Estate Research Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors, Paris 2nd-3rd September*. RICS.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Q.*, 28(1), 75-105.
- Hjelseth, E., & Nisbet, N. (2010). Exploring semantic based model checking. Dans *Proceedings of the 2010 27th CIB W78 international conference* (Vol. 54).
- Hjelseth, E., & Nisbet, N. (2011). Capturing normative constraints by use of the semantic mark-up RASE methodology. Dans *Proceedings of CIB W78-W102 Conference* (pp. 1-10).
- Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall Jr, J. R., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Wieczorek, C. J. (2015). *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer.
- İlal, S. M., & Günaydın, H. M. (2017). Computer representation of building codes for automated compliance checking. *Automation in Construction*, 82, 43-58.
- Invicara. (2018). BIM Assure. Repéré le 30/01/2019 à <http://invicara.com/offerings/technology/bim-assure>
- Jotne EPM Technology AS. (2018). ExpressAPI Users Guide. Repéré le 03/02/2019 à <https://conwik.jotne.com/display/EDM/Cpp+ExpressAPI+Users+Guide>
- Khemlani, L. (2016, 02/06/2016). Invicara BIM Assure: Cloud-Based Collaborative Model Checker. Repéré le 30/01 à <http://www.aecbytes.com/review/2016/BIMAssure.html>
- Kim, H., Lee, J. K., Shin, J., & Choi, J. (2017). BIM-supported visual language to define building design regulations. Dans *22nd International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia: Protocols, Flows and Glitches, CAADRIA 2017* (pp. 603-612). The Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA).
- Kincelova, K., Botton, C., Blanchet, P., & Dagenais, C. ((in press), June 2019). *BIM-based code compliance checking for fire safety in timber buildings: A comparison of existing tools* présentée à CSCE/CRC Construction Specialty Conference, Montréal, Québec.

- Lataille, J. I. (2002). *Fire Protection Engineering in Building Design* (pp. 40-82): Elsevier.
- Lee, H., Lee, J.-K., Park, S., & Kim, I. (2016). Translating building legislation into a computer-executable format for evaluating building permit requirements. *Automation in Construction*, *71*, 49-61.
- Lee, Y.-C., Eastman, C. M., & Solihin, W. (2016). An ontology-based approach for developing data exchange requirements and model views of building information modeling. *Advanced Engineering Informatics*, *30*(3), 354-367.
- Li, Y. (2015). Automated Code-checking of BIM models.
- Malsane, S., Matthews, J., Lockley, S., Love, P. E., & Greenwood, D. (2015). Development of an object model for automated compliance checking. *Automation in Construction*, *49*, 51-58.
- Maluk, C., Woodrow, M., & Torero, J. L. (2017). The potential of integrating fire safety in modern building design. *Fire Safety Journal*, *88*, 104-112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.12.006>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711216302028>
- Ministry of Forests, W. a. P. (2017). *The Wood Charter*. Quebec.
- National Fire Protection Association, I. (2007). *SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection*. National Fire Protection Association, Inc.
- Nawari, N. (2019). *A Generalized Adaptive Framework (GAF) for Automating Code Compliance Checking* (Vol. 9). doi: 10.3390/buildings9040086
- Nawari, N. O. (2012). Automated code checking in BIM environment. Dans *Proc. International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*.
- Nawari, N. O. (2018). *Building Information Modeling: Automated Code Checking and Compliance Processes*. CRC Press.
- NFPA, N. (2012). 550: Guide to the Fire Safety Concepts Tree. *Quincy, MA: National Fire Protection Association*.

- Nguyen, T.-H., & Kim, J.-L. (2011). Building code compliance checking using BIM technology. Dans *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2011 Winter* (pp. 3395-3400). IEEE.
- Norén, J., Strömgren, M., & Nystedt, F. (2017). *Fire Safety Design and Building Information Modelling (BIM) – Needs and Expectations in the Building Industry*. Briab Brand & Riskingenjörerna AB.
- novaCITYNETS. (2002). Fornax. Repéré à <http://www.novacitynets.com/fornax/>
- Östman, B., Brandon, D., & Frantzych, H. (2017). Fire safety engineering in timber buildings. *Fire Safety Journal*, 91, 11-20.
- Östman, B., Mikkola, E., Stein, R., Frangi, A., König, J., Dhima, D., . . . Bregulla, J. (2010). Fire safety in timber buildings. *Technical guideline for Europe. SP, 19*.
- Porto, M., Franco, J., Correa, L., Alves, L., & Baracho, R. (2018). BIM as a Structural Safety Study Tool in Case of Fire-BIMSCIP.
- Preidel, C., & Borrmann, A. (2015). Automated code compliance checking based on a visual language and building information modeling. Dans *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 32, pp. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.
- Preidel, C., & Borrmann, A. (2016). Towards code compliance checking on the basis of a visual programming language. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 21(25), 402-421.
- Preidel, C., Daum, S., & Borrmann, A. (2017). Data retrieval from building information models based on visual programming. *Visualization in Engineering*, 5(1), 18. doi: 10.1186/s40327-017-0055-0. Repéré à <https://doi.org/10.1186/s40327-017-0055-0>
- Pries-Heje, J., Baskerville, R., & Venable, J. R. (2008). Strategies for Design Science Research Evaluation. Dans *ECIS* (pp. 255-266).
- Quintiere, J. G. (2002). Fire behavior in building compartments. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(1), 181-193. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S154074890280027X>

- Rüppel, U., & Schatz, K. (2017). Research with BIM for Fire Protection. *FeuerTrutz International, 1*. Repéré à https://www.iib.tudarmstadt.de/media/iib_medien/downloads/FTI_01_2017_Rueppel_BIM.pdf
- SFPE. (2011). *Building Information Modeling and Fire Protection Engineering*. SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS.
- Schnabel, M. A. (2007). Parametric Designing in Architecture. Dans (pp. 237-250). Springer Netherlands.
- Solihin, W. (2015). *A simplified BIM data representation using a relational database schema for an efficient rule checking system and its associated rule checking language* (Georgia Institute of Technology).
- Solihin, W., Dimiyadi, J., Lee, Y., Eastman, C., & Amor, R. (2017). *The Critical Role of Accessible Data for BIM-Based Automated Rule Checking Systems*. doi: 10.24928/JC3-2017/0161
- Solihin, W., & Eastman, C. (2015). Classification of rules for automated BIM rule checking development. *Automation in construction, 53*, 69-82.
- Solihin, W., Shaikh, N., Rong, X., & Lam, K. (2004). *Beyond interoperability of building model: a case for code compliance checking*.
- Spearpoint, M. (2005). Fire Engineering properties in the IFC building product model and mapping to BRANZFIRE. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, 7*(3), 134-147.
- Spearpoint, M. (2006). Fire engineering properties in the IFC building product model and mapping to BRANZFIRE.
- Taciuc, A., Karlshøj, J., & Dederichs, A. (2016). Development of IFC based fire safety assesment tools. Dans *Proceedings of the International Rilem Conference Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016* (pp. 60-69). Rilem publications.
- Tekla User Assistance. (2018). Limitations in IFC object conversion. Repéré le 30/04/2019 à https://teklastructures.support.tekla.com/2018i/en/int_ifc_object_conversion_limitations

- Torvi, D., Kashef, A., Benichou, N., & Hadjisophocleous, G. (2005). *FIERAsystem Radiation to Adjacent Buildings Model (RABM): Theory Report*. doi: 10.4224/20377064
- Veilleux, L., Gagnon, S. & Dagenais, C.(2015). *Bâtiments de construction massive en bois d'au plus 12 étages*. 64 p.
- Zhang, J., & El-Gohary, N. (2017). Semantic-Based Logic Representation and Reasoning for Automated Regulatory Compliance Checking. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(1), 04016037. doi: doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000583.

