



HAL
open science

Modélisation et représentation des exigences spatiales qualitatives : Vers des pratiques BIM orientées “ espace ”

Aida Siala

► To cite this version:

Aida Siala. Modélisation et représentation des exigences spatiales qualitatives : Vers des pratiques BIM orientées “ espace ”. Architecture, aménagement de l'espace. Université de Lorraine; Université de Carthage (Tunisie), 2019. Français. NNT : 2019LORR0191 . tel-02526590

HAL Id: tel-02526590

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02526590>

Submitted on 31 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



MODELISATION ET REPRESENTATION DES EXIGENCES SPATIALES QUALITATIVES

Vers des pratiques BIM orientées « espace »

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DES UNIVERSITES DE LORRAINE & DE CARTHAGE

Mention : « Sciences de l'architecture »

par

Aida SIALA CHAKROUN

le 04 Novembre 2019

Rapporteurs :	Mme Sylvie Jancart Professeur	Faculté d'architecture- ULiège Directrice du LNA
	Mr Daniel Siret Maitre de conférences HDR	Universités de Grenoble et Nantes Directeur UMR ENSAG et ENSAN
Examineurs :	Mr Mounir Dhoub Professeur	ENAU- Université de Carthage Directeur de l'ED-SIA
	Mr Jean-Charles Lamirel Maitre de conférences HDR	Université de Strasbourg, LORIA
Directrice :	Mme Najla Allani Bouhoula Professeur	ENAU- Université de Carthage Directrice de l'unité 2MRCA
Co-directeur :	Mr Gilles Halin Maitre de conférences, HDR	Université de Lorraine Directeur du CRAI
Co-encadrant : invité	Mr Mohamed Bouattour Maitre-assistant	ENAU- Université de Carthage
Invitée :	Mme Alexia Courdurie Ingénieur	Société dRofus AS Responsable France

MODELISATION ET REPRESENTATION DES EXIGENCES SPATIALES QUALITATIVES

Vers des pratiques BIM orientées « espace »

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DES UNIVERSITES DE LORRAINE & DE CARTHAGE

Mention : « Sciences de l'architecture »

par

Aida SIALA CHAKROUN

le 04 Novembre 2019

Résumé

En concevant, l'architecte donne à l'espace non seulement une forme, mais aussi des aspects de topologie, d'accessibilité et de confort. Cette production est basée sur un ensemble d'exigences spatiales qualitatives (ESQL) décrites sous forme textuelle dans les documents de programmation architecturale (ex. les exigences de relation entre espaces, les exigences de proximité, de distribution, d'accessibilité, etc.). Ces exigences sont très utiles durant la phase de conception, desquelles dépend toute la mise en forme du projet et sur lesquelles se base le concepteur pour l'évaluation de sa conception tout au long de l'évolution du projet.

La démarche BIM repose sur des formats standards qui transforment toute l'information sur le bâtiment en données essentiellement quantitatives, ne permettant pas de prendre en compte ces types d'exigences. Ainsi, dans les pratiques BIM actuelles le concepteur se trouve contraint de consulter les ESQL dans un travail de va et vient entre l'outil de conception (l'outil BIM) et le programme architectural (en format papier ou en format numérique) tout au long du processus de conception.

Dans ce travail de recherche, nous proposons une nouvelle approche de conception qui permet d'intégrer les ESQL du programme à l'outil BIM (Revit) et de vérifier la conformité de la conception en fonction. L'objectif de cette approche est d'assister le concepteur à produire des modèles BIM plus conformes aux exigences du programme et d'optimiser le temps de conception. Notre approche repose sur un nouveau modèle d'espace qui inclut et structure l'information sur les ESQL les plus fréquemment utilisées en phase de programmation architecturale. La spécification de ce modèle est basée sur un travail d'analyse qualitative d'une sélection de documents de programmation architecturale qui nous a permis d'identifier les ESQL les plus pertinentes à prendre en compte dans les pratiques BIM courantes.

L'approche proposée a d'abord été évaluée suivant un protocole expérimental de validation dans le cadre d'une expérimentation pédagogique. Ce qui a démontré qu'elle permet effectivement de produire des modèles BIM plus conformes aux exigences du programme et d'optimiser le temps de conception. Cette approche a ensuite été évaluée dans un travail d'analyse critique de l'expérimentation qui a permis de constater que l'expérience s'est bien déroulée dans le respect de la démarche fonctionnelle prévue et suivant le protocole expérimental défini à cet effet. Cette dernière étape d'évaluation a également permis de conclure que notre approche ne présente pas de failles empêchant son utilisation et qu'elle doit être à présent validée suivant un protocole expérimental plus large, dans un milieu professionnel réel impliquant différents types de grands projets.

Mots clés :

Assistance à la conception architecturale, BIM, exigence spatiale, topologie, accessibilité, confort, conception paramétrique.

Abstract

When designing, the architect gives the space not only a form, but also aspects of topology, accessibility and comfort. This production is based on a set of qualitative spatial requirements (ESQL) described in textual form in architectural programming documents (eg. Relationship requirements between spaces, proximity requirements, distribution, accessibility, etc.) . These requirements are very useful during the design phase, on which the entire design of the project depends and on which the designer relies to evaluate its design throughout the project.

The BIM approach is based on standard formats that transform all building information into essentially quantitative data, making it impossible to take into account these types of requirements. Thus, in the current BIM practices the designer is forced to consult the ESQL in a work of come and go between the design tool (BIM tool) and the architectural program (in paper format or in digital format) while along the design process.

In this research work, we propose a new design approach that integrates the program's ESQL within the BIM tool (Revit) and verifies the conformance of the design in function. The goal of this approach is to assist the designer in producing BIM models that better meet program requirements and optimize design time. Our approach is based on a new model of space that includes and structures information on the most frequently used ESQL in the architectural programming phase. The specification of this model is based on a qualitative analysis of a selection of architectural programming documents that allowed us to identify the most relevant ESQL to be considered in current BIM practices.

The proposed approach was first evaluated using an experimental validation protocol as part of a pedagogical experiment. This has demonstrated that it effectively enables the production of BIM models that are more in line with program requirements and optimizes design time. This approach was then evaluated in a critical analysis work of the experiment, which made it possible to note that the experiment went well in the respect of the planned functional step and according to the experimental protocol defined for this purpose. This last evaluation step also led to the conclusion that our approach does not present flaws preventing its use and that it must now be validated according to a wider experimental protocol, in a real professional environment involving different types of major projects.

Key words :

Architectural design assistance, BIM, spatial requirement, topology, accessibility, comfort, parametric design.

A mes parents,

*A mon mari et mes enfants pour leur patience et leur
compréhension,*

A mes frères et sœurs,

*A mes amis pour leur soutien et leurs précieux
conseils.*

Remerciements

J'adresse mes remerciements à Najla Allani, directrice de l'unité de recherche Méthodes et Modèles pour la Représentation de la Connaissance en Architecture (2MRCA) qui a dirigé mon travail de thèse. Je lui exprime ma reconnaissance pour ses conseils et son aide précieuse.

Je remercie tout particulièrement Gilles Halin, directeur du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (CRAI) et co-directeur de ma thèse, pour son dévouement et son implication. Son aide, ses conseils et ses qualités humaines ont conditionné la réussite de ce travail de recherche.

Je tiens également à remercier Mohamed Bouattour, membre de l'unité de recherche 2MRCA et co-encadrant de cette thèse de m'avoir parrainée dans ce domaine de recherche et de m'avoir accompagné et soutenu tout au long de ces années d'étude.

J'adresse également mes remerciements sincères aux membres de mon jury de thèse : Sylvie Jancart (directrice de recherche à l'université de Liège) et Daniel Siret (Directeur de recherche à l'université de Nantes) pour avoir accepté de rapporter ce travail, ainsi qu'à Mounir Dhouib (Professeur à l'université de Carthage et directeur de l'école doctorale sciences et Ingénieries architecturales ED-SIA) pour avoir accepté d'être examinateur.

Je remercie chaleureusement tous les membres du CRAI de m'avoir accueillie et d'avoir participé à mon intégration au sein du laboratoire durant mes séjours d'étude. Je pense spécialement à son directeur Gilles Halin, aux enseignants-chercheurs et à mes collègues de recherche Élodie Hochscheid, Henri-Jean Gless et Veronika Bolshakova avec lesquels j'ai pu travailler et enrichir mes connaissances, mais également, aux personnels administratifs Grégory Stocky et Vincent Marchal pour leur aide et leur assistance au quotidien. Une mention très particulière à Karla-Victoria Calderon qui a participé à la mise en œuvre de mon travail de recherche. Je lui exprime ma reconnaissance pour son aide.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux étudiants de troisième année architecture de l'École d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis qui ont participé à l'expérimentation du prototype résultant de ma recherche.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance au Gouvernement tunisien et à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy qui ont participé conjointement au financement de ce travail de recherche.

TABLE DES MATIERES

Résumé	4
Mots clés :	4
Remerciements	8
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	12
Originalité de la thèse.....	14
Structure de la thèse.....	15
<i>PREMIÈRE PARTIE</i>	16
<i>CONTEXTE DE LA THESE : LES EXIGENCES SPATIALES DANS LES PRATIQUES BIM COURANTES</i>	16
<i>CHAPITRE 1</i> :.....	17
BIM ET ESPACE ARCHITECTURAL	17
1.1 Définitions	18
1.2 L'espace comme objet BIM	22
1.3 L'espace et ses exigences dans la programmation architecturale	23
1.4 Bilan	26
<i>CHAPITRE 2</i> :.....	27
PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE : PRISE EN COMPTE DES ESQ _L DANS LA DEMARCHE BIM.....	27
2.1 Potentiel des ESQ _L dans les pratiques BIM.....	28
2.2 Limites des formats BIM	31
2.3 Énoncé de la problématique	37
2.4 Hypothèses.....	38
2.5 Objectifs.....	39
2.6 Méthode.....	39
<i>DEUXIEME PARTIE</i> :.....	41
<i>ÉTAT DE L'ART : SITUATION DES ESQ_L DANS LES PRATIQUES BIM COURANTES</i>	41
<i>CHAPITRE 3</i> :.....	42
IDENTIFICATION ET REPARTITION DES EXIGENCES SPATIALES QUALITATIVES (ESQ _L)	42
3.1 L'analyse de contenu comme méthode de travail.....	43
3.2 La pré-analyse.....	44

3.3 Identification des qualificatifs et calcul de leurs fréquences d'apparition	48
3.4 Traitement des données, interprétation et vérification des résultats	50
3.5 Bilan.....	61
<i>CHAPITRE 4</i>	63
LES ESQ _L DANS LES OUTILS BIM ACTUELS	63
4.1 Méthode d'analyse.....	64
4.2 Pré-analyse.....	64
4.3 Analyse	76
4.4 Traitement des données et interprétation des résultats.....	78
4.5 Bilan.....	81
<i>CHAPITRE 5</i> :.....	83
LES EXIGENCES SPATIALES QUALITATIVES DANS LES MODELES D'ESPACE EXISTANTS	83
5.1 Méthode d'analyse.....	84
5.2 Représentation des espaces dans les modèles existants.....	84
5.3 Capacité des modèles étudiés à prendre en compte les ESQ _L	109
5.4 Bilan.....	112
<i>TROISIÈME PARTIE</i> :.....	114
<i>PROPOSITION D'UNE NOUVELLE APPROCHE DE CONCEPTION PRENANT COMPTE DES ESQ_L</i>	114
<i>CHAPITRE 6</i> :.....	115
SPECIFICATION D'UN MODELE D'ESPACE STRUCTURANT LES ESQ _L	115
6.1 Vers un modèle d'espace riche en exigences qualitatives.....	116
6.2 Évolution du concept d'espace architectural	128
6.3 Bilan.....	131
<i>CHAPITRE 7</i> :.....	132
PROPOSITION D'UN PROTOTYPE BASE SUR LE MODELE D'ESPACE PERMETTANT LA PRISE EN COMPTE ET LA VERIFICATION DES ESQ _L	132
7.1 Méthode de développement et démarche fonctionnelle.....	133
7.2 Saisie des exigences spatiales qualitatives.....	139
7.3 Intégration des exigences spatiales qualitatives dans Revit.....	148
7.4 Vérification des exigences spatiales qualitatives dans Revit.....	156
7.5 Bilan.....	176

<i>QUATRIEME PARTIE :</i>	178
<i>ÉVALUATION DE L'APPROCHE DE CONCEPTION PROPOSÉE</i>	178
<i>CHAPITRE 8 :</i>	179
EXPERIMENTATION DE L'APPROCHE DEVELOPPEE.....	179
8.1 Présentation du protocole expérimental.....	180
8.2 Réalisation des expériences.....	186
8.3 Analyse des données et interprétation des résultats	189
8.4 Bilan.....	198
<i>CHAPITRE 9 :</i>	199
RETOURS SUR EXPERIMENTATION ET VALIDATION DES HYPOTHESES	199
9.1 Analyse critique du type d'expérimentation	200
9.2 Analyse critique de l'approche de conception proposée.....	201
9.3 Validation des hypothèses	208
9.4 Bilan.....	210
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	211
Apport.....	211
Perspectives de recherche	214
<i>Glossaire</i>	217
<i>Liste des Publications</i>	218
<i>Bibliographie</i>	220
<i>Annexes</i>	225
<i>Table des illustrations</i>	253
<i>Liste des figures</i>	253
<i>Liste des tableaux</i>	256

INTRODUCTION GENERALE

L'entrée du secteur du bâtiment dans l'ère du numérique a fondamentalement changé la manière dont les acteurs de la conception travaillent. Il y a une trentaine d'années, la conception de bâtiment se faisait entièrement à la main ; les premières versions de logiciels CAO¹ (Conception assistée par ordinateur) n'étaient pas faciles à utiliser et l'achèvement d'un projet de conception sans avoir recours au dessin à la main était quasi impossible. Un peu plus tard, la situation s'est complètement inversée, les logiciels CAO se sont imposés dans la scène en assurant un degré de précision et de contrôle qui n'était pas possible auparavant. Il est devenu ainsi très rare de voir des projets de conception achevés uniquement à la main sans avoir recours à l'assistance par ordinateur. Cette situation n'a pas duré puisque la méthode de conception a également changé avec l'émergence du concept de « modélisation » (Arangarasan, 2000) (Myung, 2001), où il ne s'agit plus de dessiner durant l'acte de concevoir mais de modéliser le bâtiment dans l'objectif de produire un modèle d'information comportant les données techniques nécessaires à sa conception, sa construction, son entretien, etc. Ce qui a rapidement conduit à la naissance du terme « Building Information Modeling » ou « BIM », notamment depuis le grand débat des deux éditeurs de logiciels de conception Autodesk² et Bentley³ qui s'est déroulé en avril 2003 et qui a porté sur leurs approches respectives en matière de modélisation des données de bâtiment⁴.

Depuis lors, plusieurs travaux de recherches se sont intéressés à la modélisation et à la représentation des informations du bâtiment (De Luca L. V., 2006), (Azhar, 2008). Cette nouvelle technologie et les outils de conception qui l'accompagnent ont progressivement envahi les pratiques collaboratives et modifié de façon radicale le secteur du bâtiment et le quotidien de ses acteurs, notamment avec l'émergence du concept d'« Industrie 4.0 » qui a caractérisé la transition au BIM en Europe. Ce concept tire ses origines d'une réflexion allemande apparue en 2011, qui a rapidement envahi toute l'Europe (Kagermann, 2013). Il s'agit d'une nouvelle façon d'organiser les moyens de production basée sur la connectivité des données et des objets afin de créer de l'intelligence dans les systèmes manufacturiers.

¹ Conception assistée par ordinateur

² <https://www.autodesk.com>

³ <https://www.bentley.com>

⁴ Débat animé par Jerry Laiserin et repris ensuite dans sa lettre *The LaiserinLetter* (<http://www.laiserin.com/features/bim/index.php>)

Dans le domaine du bâtiment, l'« industrie 4.0 » s'est manifestée par l'avènement du BIM. Il s'agit de construire un « bâtiment virtuel » basé sur une géométrie 3D paramétrique de dimension variable où les règles de construction géométrique ajoutent une « intelligence » aux objets architecturaux, tout en permettant la représentation des relations géométriques et fonctionnelles. Le modèle d'information du bâtiment doit fournir une source unique, logique et cohérente de toutes les données associées tout au long de son cycle de vie. Ce paradigme est basé sur des standards d'échanges qui assurent l'interopérabilité⁵ des données techniques entre les logiciels des différents acteurs du domaine ; le format IFC (Industry Foundation Classes) en est un exemple. Ces standards sont en perpétuelle évolution pour couvrir toute l'information sur le bâtiment le long de son cycle de vie. Cependant, leur élargissement à certains sous-domaines spécifiques exigeant une interopérabilité sémantique (portant sur des données qualitatives) se heurte à des défis, car ces standards transforment les informations du bâtiment en données essentiellement quantitatives.

Dans ce sens, les informations concernant les exigences de programmation architecturale restent encore peu explorées. Pourtant les exigences spatiales sont très utiles durant le processus de conception, non seulement pour guider la mise en forme du projet, mais également pour évaluer la conformité de la conception aux exigences requises. Afin de tirer le meilleur parti de la démarche BIM, les acteurs de la programmation architecturale doivent comprendre le modèle BIM du point de vue des concepteurs. À leur tour, les concepteurs doivent comprendre les meilleures façons d'intégrer et d'exploiter les informations précisées par les acteurs de la programmation dans leurs modèles BIM.

⁵ Possibilité de communication entre différents systèmes informatiques.

Originalité de la thèse

La production architecturale se fait sur la base d'un ensemble d'exigences spatiales déterminées en phase de programmation architecturale bien avant le processus de conception. Ces exigences sont généralement données sous forme de contraintes quantitatives à l'image des exigences géométriques (ex. longueur, largeur, hauteur sous plafond, etc.) mais aussi et surtout sous forme de contraintes qualitatives comme les exigences de relation des espaces les uns par rapport aux autres (ex. en relation avec), les exigences de disposition (ex. à proximité de, contiguë à) ou encore les exigences d'accessibilité (ex. accessible depuis). Partant de ces exigences spatiales, le concepteur donne à l'espace architectural non seulement une forme, mais aussi d'autres aspects d'accessibilité, de topologie et de confort. Il utilise différents moyens de représentation pour mettre en forme et pour communiquer ces différents aspects tout au long du processus de conception.

Les exigences spatiales qualitatives (ESQL) sont indispensables au début de la phase de conception pour guider le concepteur dans la mise en forme du projet. Elles sont également très utiles tout au long de cette phase pour évaluer la conformité de la conception au programme demandé. Cependant, dans les pratiques BIM courantes ces exigences sont partiellement connues par les architectes et les concepteurs qui se trouvent alors contraints de consulter plusieurs fois le programme architectural pour retrouver l'information et vérifier la conformité de leurs modèles de conception au fur et à mesure que le projet évolue. Cette démarche représente, bien évidemment, une importante perte de temps et d'informations plus particulièrement dans les projets fortement collaboratifs où les données non capturées par l'outil BIM sont sujettes à être omises.

Les outils BIM actuels ne cessent d'évoluer pour permettre de concevoir et de collaborer en prenant en compte toute l'information sur le bâtiment. Leur évolution dans la prise en compte des ESQL se voit toutefois freinée, notamment par les limites des formats BIM qui assurent l'interopérabilité entre ces outils. La prise en compte des ESQL dans les pratiques BIM actuelles permet d'orienter l'intérêt des concepteurs vers le respect de ces exigences et de les assister à produire des modèles plus conformes aux exigences requises, tout en optimisant le temps de conception. C'est partant de cette hypothèse que cette thèse a vu le jour.

Notre recherche s'intéresse ainsi aux pratiques BIM actuelles afin d'y intégrer les informations sur les ESQL en vue de permettre au concepteur de les consulter et de vérifier la conformité des modèles BIM en fonction, tout au long du processus de conception.

Structure de la thèse

Cette thèse est découpée en quatre parties. **Dans la première partie**, le contexte de la recherche est exposé. Les termes abordés autour du BIM et du concept d'espace architectural sont définis et l'importance de la prise en compte des ESQ_L dans les pratiques BIM courantes est mise en avant. Enfin, la problématique de la thèse est énoncée, suivie de ses principaux objectifs et de la méthode adoptée pour atteindre ces objectifs.

Dans la seconde partie, nous proposerons un état de l'art concernant le concept d'espace architectural et ses ESQ_L. Il s'agit dans un premier temps d'identifier les ESQ_L les plus fréquemment décrites en phase de programmation architecturale qui sont nécessaires à prendre en compte dans les pratiques BIM actuelles. Cette étape est réalisée à l'aide d'une analyse qualitative d'une sélection de documents issus de différentes programmations architecturales. Dans un deuxième temps, il s'agit d'étudier la place des ESQ_L identifiées dans les outils BIM actuels. Cette étape repose sur l'analyse de la capacité de différents outils BIM à prendre en compte, à représenter et à gérer l'information sur les ESQ_L. Enfin, l'état de l'art porte sur la situation des ESQ_L dans les modèles de données existants qui traitent du concept d'espace architectural.

Dans la troisième partie, nous proposons une approche de conception qui permet d'intégrer les ESQ_L dans l'outil BIM et d'évaluer les modèles BIM conçus en fonction. Cette proposition repose sur une première étape de spécification d'un nouveau modèle d'espace incluant et structurant l'information sur les ESQ_L. Elle consiste ensuite au développement d'un prototype permettant d'intégrer et de gérer les ESQ_L dans l'outil BIM. Dans cette deuxième étape, la démarche fonctionnelle de notre approche de conception est d'abord définie et la méthode de développement et ses différentes étapes sont exposées.

Enfin, la quatrième partie est consacrée à l'évaluation de l'approche développée suivant un protocole expérimental de validation. Ce travail d'évaluation s'étale sur deux étapes, la première étape concerne la réalisation d'une expérimentation pédagogique qui confronte l'utilisation de l'approche de conception proposée à l'utilisation de l'approche de conception habituelle. La deuxième étape s'intéresse à l'inspection du travail d'expérimentation. Elle présente une analyse critique du protocole expérimental et de l'approche de conception proposée et en propose des pistes d'amélioration et d'évolution possibles menant à la validation de cette approche.

PREMIÈRE PARTIE

CONTEXTE DE LA THESE : LES EXIGENCES SPATIALES DANS LES PRATIQUES BIM COURANTES

La démarche BIM est une technologie en plein essor dans le domaine du bâtiment. Nous nous intéressons au niveau de cette étude aux pratiques BIM durant les phases de programmation et de conception architecturale afin de prendre en compte les exigences spatiales qualitatives (ESQL) du programme dans le processus de conception.

Cette première partie porte sur la présentation du contexte de ce travail de recherche, elle se compose essentiellement de deux étapes. Dans la première étape, nous nous intéressons d'abord à la définition du concept d'espace architectural comme un objet BIM régi par des contraintes de conception aussi bien que des contraintes de programmation. Nous mettons ensuite l'accent sur l'importance des ESQL en phase de programmation architecturale pour la description des contraintes de relation, de disposition, d'accessibilité et de confort des espaces, mais aussi et surtout, en phase de conception pour assister le concepteur à la mise en forme et à l'évaluation du projet conformément à ces exigences.

Dans la deuxième étape, nous mettons en évidence la problématique de la prise en compte des ESQL dans les pratiques BIM courantes, face aux limites des formats BIM existants à supporter tels types d'informations. Sur la base de ces constats, notre problématique de recherche sera ensuite énoncée, suivie des hypothèses que nous sommes amenés à formuler, des objectifs à atteindre et de la méthode permettant de les atteindre.

CHAPITRE 1 :

BIM ET ESPACE ARCHITECTURAL

La proposition d'une approche de conception qui permet de prendre en compte les ESQ_L du programme en phase de conception ne peut être envisagée sans une étude du contexte du concept d'espace et de ses exigences aussi bien dans le contexte de la programmation architecturale que dans la technologie BIM. Notre propos dans le présent chapitre n'est pas d'effectuer une analyse critique des informations prises en compte par le BIM sur l'espace architectural ni de faire une analyse approfondie qui permet de discerner les ESQ_L décrites en phase de programmation, mais de sensibiliser à l'utilité des ESQ_L en phase de conception et de mettre en évidence leur absence dans la technologie BIM.

Dans ce chapitre, nous exposons tout d'abord une définition générale de l'acronyme BIM et de ses différentes significations et nous identifions la terminologie qui sera utilisée au niveau de cette étude pour désigner chaque signification. Nous présentons ensuite le concept d'espace architectural comme concept clé permettant d'intégrer les ESQ_L dans les pratiques BIM courantes. Enfin, nous nous intéressons particulièrement à la mise en évidence de l'importance des ESQ_L dans la description des espaces en phase de programmation architecturale et de leur utilité en phase de conception pour assister la mise en forme du projet et pour faciliter l'évaluation de la conception.

Ce premier chapitre présente le cadre général de notre étude. Plus tard, toute une partie sera dédiée à l'analyse détaillée de la situation du concept d'espace architectural et de ses ESQ_L dans la programmation architecturale, dans les outils BIM actuels et dans les différents modèles d'espace existants.

1.1 Définitions

1.1.1 L'acronyme BIM

L'acronyme anglophone BIM peut avoir différentes significations selon la désignation des lettres qui le composent. La lettre « B » désigne le mot *Building*, la lettre « I » désigne le mot *Information* et la lettre « M » peut désigner trois différents mots, à savoir : *Modeling*, *Model* ou *Management*.

La compréhension du BIM est multiple, elle englobe l'information, la géométrie, le partage entre les acteurs du projet, la démarche, etc. (Halin, 2016). Plusieurs ouvrages et articles de journaux (Zuppa, 2009)(Becerik-Gerber, 2010)(Hardin, 2015) ont été consacrés aux professionnels du domaine du bâtiment entre concepteurs, sous-traitants et gestionnaires pour définir la signification du BIM selon la perception de chacun. Pour distinguer les différentes significations du BIM, nous adoptons, dans la présente étude, les définitions générales proposées dans l'ouvrage « BIM et Maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction »⁶.

Cet ouvrage définit le ***Building Information Modeling*** comme le processus qui permet à tous les intervenants du domaine du bâtiment d'avoir l'accès aux mêmes informations numériques en même temps, grâce à l'interopérabilité entre les plateformes technologiques. Pour désigner ce processus, nous utiliserons dans cette thèse le terme « **démarche BIM** ».

Le ***Building Information Model*** est défini comme le modèle numérique constitué d'un ensemble structuré d'informations sur un bâtiment. Pour désigner ce concept, nous utiliserons dans ce travail le terme « **modèle BIM** ».

Enfin, le ***Building Information Management*** est défini comme l'organisation et le contrôle du processus qui utilise les informations du modèle BIM pour assurer le partage de l'information tout au long du cycle de vie d'un bâtiment. Pour lequel, le terme « **BIM Management** » sera utilisé.

⁶ Ouvrage réalisé sous la direction d'Olivier Celnik et Eric Lebègue avec le concours de Guersendre Nagy et la contribution de 140 professionnels, publié par les éditions Eyrolles et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB en juin 2014.

1.1.2 Le BIM (Building Information Model)

Le modèle BIM (*Building Information Model*), la maquette numérique ou encore le modèle d'information du bâtiment est défini par le comité du projet BuildingSMARTalliance⁷, comme la représentation numérique des caractéristiques physiques et fonctionnelles d'un bâtiment. La démarche BIM est fondée sur des standards ouverts pour l'interopérabilité et sert de source de connaissances partagées de l'information sur le bâtiment et en constitue une base de données fiable tout au long de son cycle de vie (figure 1). Un modèle BIM est un modèle 3D « intelligent » (Macher, 2017) constitué des éléments graphiques 2D et 3D du bâtiment et comporte toute l'information sur les objets qui le composent. Ces **objets** peuvent être des **ouvrages** (murs, dalles, ouvertures, escaliers, poteaux, poutres, etc.), des **espaces** (site, bâtiment, étage, zone, pièce, etc.) ou des **équipements** (équipement électrique, de plomberie, de sécurité, du mobilier, etc.).

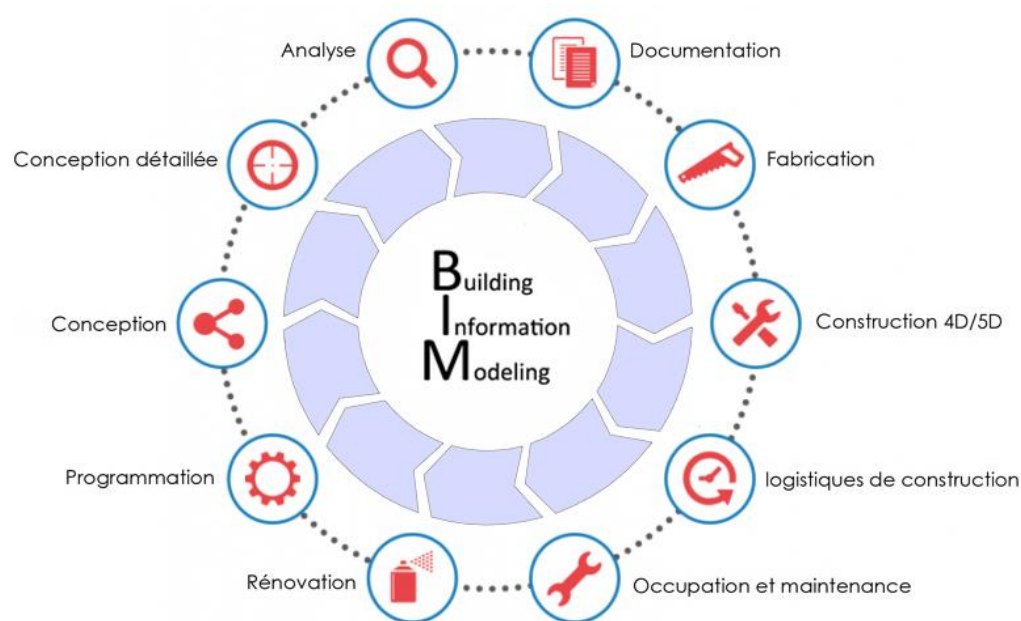


Figure 1 Gestion du cycle de vie d'un bâtiment à travers la démarche BIM
(Inspirée du site : <https://www.villiers94.fr/actualite/le-bim-en-10-questions>)

Dans le présent travail, le terme « **Ouvrage** » sera utilisé pour désigner tous les éléments physiques d'un bâtiment qui sont composés de couche(s) de matériaux de construction,

⁷ BuildingSMART (Ancienne Alliance Internationale pour l'Interopérabilité IAI) est l'autorité mondiale qui conduit la transformation de l'économie d'actifs bâtis par la création et l'adoption de standards internationaux ouverts. Anciennement appelée IAI (International Alliance for Interoperability), elle a été créée en 1996 et a évolué depuis pour répondre aux demandes des secteurs du bâtiment et des infrastructures. L'organisation a changé de nom en 2008 pour mieux refléter sa nature et ses objectifs.

servant à délimiter des espaces. À son tour, le terme « **Espace** » sera utilisé pour désigner les vides délimités par un assemblage d'ouvrages de bâtiment (d'une manière physique ou virtuelle), servant à recevoir des fonctions et à permettre des activités.

La création, la manipulation et la vérification de modèles BIM se fait à travers des logiciels appropriés qui permettent de modéliser en 2D et en 3D, de collaborer, d'analyser (ex. analyse énergétique), de vérifier (ex. détection des conflits des versions), de planifier la construction, d'en estimer le coût, etc. Pour désigner ces logiciels, nous utiliserons dans la présente étude le terme « **Outils BIM** ».

1.1.3 Les formats BIM

Le modèle BIM représente le principal moyen d'échange de données entre les différents acteurs du domaine du bâtiment à travers la démarche BIM ouvert (*OpenBIM*⁸). Cette approche est l'initiative de BuildingSMART avec plusieurs éditeurs d'outils BIM qui ont commencé par la définition de l'IFC comme format de données indépendant orienté objet pour l'échange des données numériques. Cette initiative a été complétée par la définition d'autres formats qui s'intéressent à l'échange des informations collaboratives (format BCF), textuelles (format IFD) et contractuelles (format IDM).

a- Le format IFC (Industry Foundation Classes)

IFC est le premier standard de données ouvert initié par BuildingSMART. Ce format fournit de nombreuses structures de données couvrant presque tous les aspects d'un ouvrage bâti avec un large éventail d'informations de représentation de domaines et de sous-domaines, notamment en architecture et en conception structurelle. Le format IFC a été adopté en tant que norme ISO en 2013 (ISO 16739,2013), il est pris en charge par la plupart des outils BIM courants et est actuellement considéré comme le standard BIM le plus connu et le plus largement utilisé dans la démarche BIM. Ce format est actuellement à sa version IFC 4 Add 2⁹. Il est en évolution continue dans l'objectif de pouvoir inclure toute l'information sur le bâtiment tout au long de son cycle de vie. Malgré de nombreux progrès ces dernières années, l'élargissement des IFC sur certains sous-domaines spécifiques qui exigent une interopérabilité sémantique se heurte à des défis, notamment en ce qui concerne l'échange de données qualitatives (Steel, 2012). Plusieurs travaux sont dédiés au développement du format IFC dans

⁸ L'*OpenBIM* est une approche universelle de l'activité collaborative de conception, de construction et d'occupation d'ouvrages, basée sur des standards ouverts de flux de travail.

⁹ www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/

ce sens à l'image de la prise en compte des informations concernant la programmation architecturale. L'échange des données à travers ce format reste encore à perfectionner car des pertes de données et des erreurs d'interprétation peuvent encore se produire de nos jours (Borrmann, 2018). Le problème ici ne semble pas venir uniquement du format IFC, mais aussi de son utilisation qui requiert deux conversions, une avec le logiciel qui exporte et l'autre avec le logiciel qui importe. Cette double conversion augmente les risques d'erreurs.

b- Le format BCF (BIM Collaboration Format)

Ce format a été créé afin de séparer les informations concernant la collaboration des informations concernant le bâtiment. Avant sa spécification, les utilisateurs qui désiraient échanger sur les problèmes de partage de données, de détection de conflits ou des demandes de modifications, devaient s'envoyer le modèle BIM au complet. Le format BCF facilite ainsi la collaboration en permettant d'échanger uniquement des commentaires qui peuvent être accompagnés de parties du modèle BIM, de vues en 3D, etc.

c- Le format IFD (International Framework for Dictionaries)

Le format IFC constitue un standard d'échange d'informations principalement géométriques entre différents outils BIM, il ne permet pas d'échanger certaines propriétés données sous forme textuelle. Par exemple, l'architecte définit l'occupation d'un espace en « kitchenette ». L'ingénieur en génie civil doit connaître la fonction de cet espace afin de calculer sa charge. C'est dans ce contexte qu'intervient le format IFD pour assurer que les concepts et les caractéristiques soient compris par tous les outils dans toutes les langues. Il crée un catalogue ou un dictionnaire d'objets et rassemble les données dans une vue commune, en associant les informations provenant des différents intervenants tout en gérant des langages différents. C'est ainsi que le format IFD est introduit comme un langage commun ou comme norme de bibliothèque de terminologie qui permet de collecter les termes et les vocabulaires utilisés pour les attribuer aux objets et faciliter par conséquent aux différents outils BIM la compréhension des propriétés textuelles échangées.

d- Le format IDM (Information Delivery Manual)

Échanger des données nécessite des règles d'utilisation selon le type de bâtiment et la phase du cycle de vie, mais aussi selon le métier et le niveau de détail attendu. Le format IDM a pour objectif de normaliser les informations devant figurer dans un échange sous contrat. Un manuel d'information de livraison doit détailler les processus du cycle de vie d'un ouvrage bâti en indiquant les exigences nécessaires à la bonne exécution de chaque processus. Il doit

également indiquer les acteurs qui sont censés créer, utiliser et tirer profit des informations et des exigences et peut également détailler les solutions logicielles à utiliser pour lire, manipuler et augmenter les informations fournies. En d'autres termes, l'IDM décrit les processus de construction du bâtiment et définit les exigences des informations afin d'assurer à chaque acteur les informations dont il a besoin au moment et au format opportuns.

1.2 L'espace comme objet BIM

Un modèle BIM repose sur une représentation explicite et rigoureuse de la sémantique¹⁰ des objets qui le composent (Bouattour, 2005), dans lequel chaque objet du bâtiment est assimilé à un 'objet informatique' qui appartient à une classe ayant des attributs et des relations qui le lient avec le reste des objets d'un même bâtiment. Étant l'un de ces objets, l'espace architectural est défini dans le modèle BIM par **une classe** qui rassemble les caractéristiques communes de la catégorie d'objets à laquelle il appartient. La figure 2, présente l'exemple d'un espace avec la liste des propriétés qui lui sont associées dans l'environnement de l'outil Revit (Autodesk). Dans cet exemple, l'objet sélectionné « Espace 3 » appartient à la classe des 'Pièces'. Comme toute autre classe, la classe des 'Pièces' possède **des attributs** qui rassemblent ses données géométriques, ses données d'identification, ses caractéristiques, etc. Elle a également **des relations** binaires¹¹ la liant avec les autres objets du bâtiment. Par exemple, l'objet « mur » est relié à l'objet « espace » à travers la relation « délimite » et son inverse « est délimité par ». Cette classe possède en outre **des contraintes** qui décrivent les exigences de son agencement dans le modèle BIM (limite supérieure, décalage limite, décalage inférieur, etc.).

Un espace est également régi par un autre type de contraintes qui sont exigées par le programme architectural. Ces contraintes sont essentiellement données sous forme d'exigences spatiales qualitatives qui sont très utiles en phase de conception, mais qui ne sont pas prises en compte par les formats et les outils BIM actuels.

¹⁰ Étude du langage du point de vue du sens.

¹¹ Relations limitées à deux classes d'objets.

Modifier Pièces	
Propriétés	
Pièces (1)	Modifier le type
Contraintes	
Niveau	Niveau 0
Limite supérieure	Niveau 0
Décalage limite	2.4384
Décalage inférieur	0.0000
Cotes	
Surface	14.418 m ²
Périmètre	15.2000
Hauteur non liée	2.4384
Volume	Non calculé
Hauteur de calcul	0.0000
Données d'identification	
Numéro	6
Nom	Espace 3
Image	

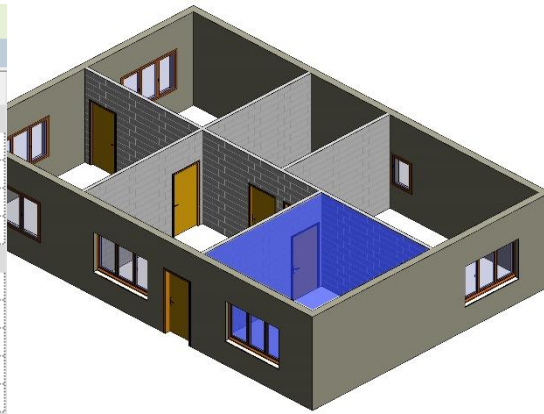


Figure 2 Exemple d'un objet de bâtiment avec la liste de ses propriétés dans l'environnement de Revit

1.3 L'espace et ses exigences dans la programmation architecturale

1.3.1 L'espace dans la programmation architecturale

À l'origine de tout projet architectural se trouve l'expression d'un besoin. Cette expression est fondée sur une analyse des exigences ayant comme produit final un programme architectural (ou une étude de programmation architecturale). La programmation architecturale doit permettre au concepteur de se faire une idée sur l'organigramme général selon lequel doivent s'organiser les espaces à fournir, ainsi que sur les traitements et les dispositions nécessaires à prendre en compte à l'intérieur de ces espaces afin d'assurer le bon déroulement des activités et le confort des futurs usagers. Le programme définit un ensemble d'exigences spatiales qui peuvent être classées comme suit :

- **des exigences spatiales quantitatives** (ESQ_N) telles que les exigences géométriques (ex. surface, hauteur sous plafond, largeur, etc.),
- **des exigences spatiales qualitatives** (ESQ_L) telles que les exigences décrivant la disposition des espaces les uns par rapport aux autres pour assurer le bon fonctionnement du projet (ex. proximité, contiguïté), leur distribution (ex. horizontale, verticale), leur éventuelle relation (ex. intérieure, extérieure, directe, visuelle, etc.), leur accessibilité (ex. accès direct, espace à travers lequel doit se faire l'accès), le type d'éclairage ou de ventilation à prévoir, etc.

1.3.2 Importance des exigences spatiales qualitatives (ESQL)

Les ESQL représentent les exigences principales sur lesquelles se base toute conception architecturale. Ces exigences guident le concepteur dans la prise de décision en lui permettant d'évaluer la conformité de son modèle de conception au programme demandé et cela tout au long du processus de conception. Les ESQL sont omniprésentes dans la programmation de toutes les formes de projets et elles se montrent plus détaillées et plus complexes relativement à l'ampleur du projet en question. Par exemple, les premières intentions du propriétaire d'une maison peuvent être « *un séjour bien ensoleillé, à proximité de la cuisine* ». Il s'agit ici de deux exigences qualitatives associées à l'espace « séjour », à savoir l'ensoleillement et la proximité par rapport à l'espace « cuisine ». Dans un exemple de projet plus grand, la conception du bloc opératoire dans un hôpital est guidée par un ensemble d'exigences qualitatives que nous synthétisons comme suit : « *Les vestiaires d'accès au bloc opératoire doivent être distribués à partir d'un circuit propre. Ils permettent l'accès au bloc selon un principe de marche en avant qui assure le déshabillage du staff, la mise des tenus et la stérilisation des mains avant de passer au champ stérile. Le retour du staff vers les vestiaires se fait à travers un espace de transition qui assure le dépôt des tenues de bloc utilisées* ». Ces propos illustrent un ensemble d'exigences spatiales de **distribution, d'accessibilité et de confort** (propre, stérile).

Les études de programmation architecturale de certains ouvrages particuliers (hôpitaux, universités, palais de justice, musées, etc.) sont constituées d'exigences spatiales qualitatives multiples et variées. Ces exigences sont décrites sous forme textuelle, mais aussi sous forme de diagrammes et de schémas qui mettent en évidence graphiquement les principales **exigences d'accessibilité et de topologie** des espaces souhaités. La figure 3 montre l'organigramme fonctionnel de l'extension d'un groupe scolaire¹². Ce schéma mentionne la disposition générale des espaces et précise un certain nombre **d'exigences d'accessibilité** (accès extérieur, accès à travers un espace), **de relation** (principale, secondaire), **de visibilité et de proximité** entre eux.

L'accès à ces informations tout au long du cycle de vie du bâtiment peut s'avérer très utile, surtout durant la phase de conception quand les tâches de la conception doivent être guidées par ces exigences ; d'abord pour mettre en forme le projet, ensuite pour évaluer la conformité de la conception aux ESQL et enfin pour collaborer sur le respect de ces exigences (détection et communication des non-conformités).

¹² Étude de programmation de l'extension du groupe scolaire de Vany (2013).

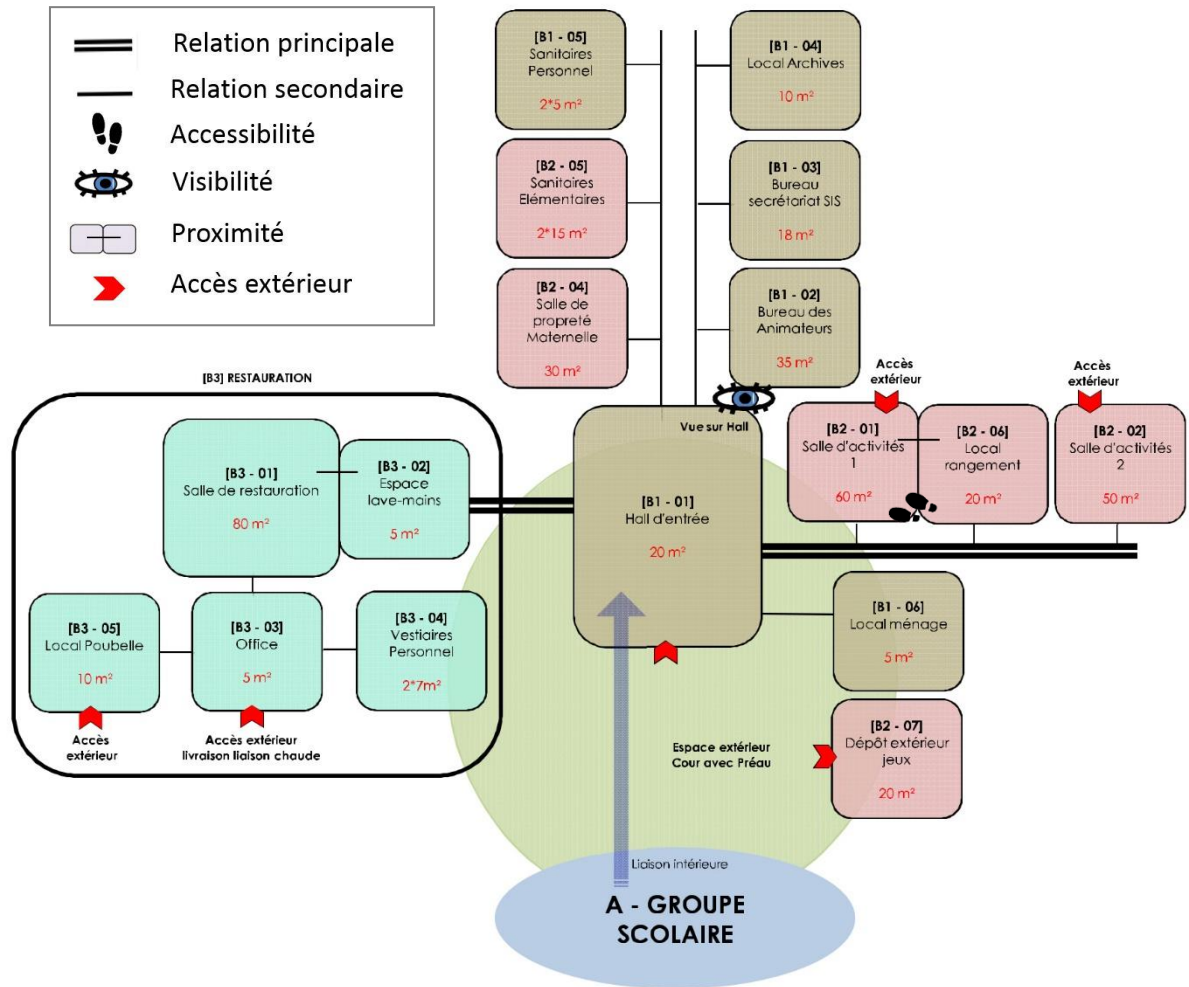


Figure 3 Organigramme fonctionnel de l'extension du groupe scolaire de Vany

1.4 Bilan

Nous avons tenté dans ce premier chapitre de préciser le contexte général du concept d'espace et de ses exigences dans la démarche BIM et dans la programmation architecturale. Ce contexte a été d'abord abordé par la présentation de l'espace architectural comme un objet BIM régi par des contraintes de conception, mais aussi par des contraintes exigées par le programme architectural. Il a été abordé ensuite par l'exploration des contraintes nécessaires à la description des espaces en phase de programmation, qui sont tout aussi essentielles et indispensables à l'aboutissement du projet durant la phase de conception. Ces contraintes sont essentiellement données sous forme d'exigences spatiales qualitatives (ESQL) qui s'avèrent très utiles en phase de conception pour assurer une mise en forme du projet selon les exigences de disposition, de relation et d'accessibilité demandées, mais aussi pour l'évaluation de la conformité de la conception au programme demandé tout au long du processus de conception.

Tenant compte de ce contexte, nous abordons dans le chapitre suivant le potentiel de l'exploitation des ESQL dans la démarche BIM, puis nous soulignons les limites des formats BIM actuels à prendre en compte ces types d'informations ce qui constitue la problématique initiale de ce travail de recherche.

CHAPITRE 2 :

PROBLÉMATIQUE DE LA THÈSE : PRISE EN COMPTE DES ESQ_L DANS LA DEMARCHE BIM

Ce chapitre porte dans un premier temps sur le potentiel de l'intégration des ESQ_L dans les pratiques BIM comme aide à la co-production, comme aide à la coordination, mais aussi à la communication entre les différents acteurs de la conception. Il met l'accent dans un deuxième temps sur la situation des ESQ_L dans la démarche BIM à travers une présentation des différentes tentatives d'intégration des exigences du programme dans les formats BIM. Cette dernière étape permet d'appréhender les différentes méthodes d'intégration des exigences du programme dans les formats BIM et d'identifier les limites de chaque méthode pour pouvoir déterminer le cadre de nos propositions.

2.1 Potentiel des ESQ_L dans les pratiques BIM

Les pratiques BIM courantes ont tendance à réduire les informations concernant les espaces en informations essentiellement quantitatives pour pouvoir ensuite les gérer. Dans cette réduction une certaine richesse de l'information spatiale est perdue (Ireland, 2015). Pour résoudre ce problème de perte d'information présente notamment dans la programmation architecturale, il est nécessaire d'instaurer une approche de conception orientée 'espace' permettant de prendre en compte et de gérer avec la démarche BIM aussi bien les exigences spatiales quantitatives (ESQ_N) que qualitatives (ESQ_L). Étant donné que l'espace architectural est un savoir partagé entre les différents acteurs du projet, contrairement à certains ouvrages de structure (ex. un poteau, une poutre, un plancher) ou de plomberie (ex. une conduite, une chaudière), fonder une démarche de conception qui repose sur une logique spatiale pourrait améliorer les pratiques collaboratives actuelles en permettant aux concepteurs d'agir sur les ouvrages en tenant compte des conséquences sur les espaces.

Évoquer l'information qualitative des exigences spatiales dans les pratiques BIM actuelles pose non seulement le problème de son intégration dans l'outil BIM, mais aussi le problème de sa représentation. Le concepteur, a-t-il besoin d'outils BIM pouvant intégrer les ESQ_L et les représenter ? Comment représenter ces informations dans l'outil BIM et quel processus prévoir pour assister le concepteur à les respecter ? Comment faciliter au concepteur la vérification de la conception et la collaboration autour des non-conformités détectées ? Toutes ces questions sont inhérentes aux pratiques BIM actuelles, en particulier durant la phase de conception quand les tâches de conception doivent être guidées par les ESQ_L du programme, plus spécifiquement celles portant sur l'accessibilité et sur la topologie des espaces, sur lesquelles repose toute la mise en forme du projet.

Les pratiques BIM actuelles doivent donc traduire les ESQ_L en s'orientant vers de nouvelles méthodes de conception, de représentation et de collaboration reposant sur une logique spatiale. En plus d'**ajouter**, de **modifier**, de **supprimer** et de **visualiser** les espaces (tableau 1), les fonctionnalités des outils BIM doivent permettre aux concepteurs d'**enrichir la description** des espaces en intégrant les exigences du programme qu'elles soient quantitatives ou qualitatives. Les outils BIM doivent également permettre aux concepteurs de **vérifier** la conformité de leurs modèles de conception relativement à ces exigences et de vérifier les conflits des versions orientés par les espaces (modifications des espaces) tout au long de l'évolution de la conception. Ces outils doivent en outre permettre de **naviguer** dans le modèle BIM selon une logique spatiale pour permettre aux concepteurs de vérifier visuellement l'état des espaces, de leurs propriétés et exigences, en 2D comme en 3D. Enfin, des alertes sous forme

de notifications peuvent être **émises** concernant les non-conformités aux exigences et concernant les conflits subits par les espaces.

	N°	Tâche	Donnée	Support
Co-production	1	<i>Ajouter / mod. /supp.</i>	Espace	Modèle BIM
	2	<i>Visualiser</i>	Espace	Modèle BIM
	3	<i>Enrichir</i>	ESQ _N	Espace
	4		ESQ _L	
Coordination	5	<i>Vérifier</i>	ESQ _N	Espace
	6		ESQ _L réglementaires, d'Équipement ou de validation BIM	
	7		ESQ _L identifiées (chapitre 3)	
	8		Conflits des versions	
	9	<i>Naviguer</i>	Espaces	Modèle BIM
Communication	10	<i>Recevoir / émettre</i>	Notifications de conformité aux ESQ _N	Espace
	11		Notifications de conformité aux ESQ _L réglementaires, d'Équipement ou de validation BIM (chapitre 3)	
	12		Notifications de conformité aux ESQ _L identifiées	
	13		Notifications de conflits des versions	

Tableau 1 Tâches mettant en évidence la pertinence du concept d'espace architectural dans les pratiques BIM.

Dans de telles pratiques BIM, l'espace architectural peut représenter une assistance à l'activité collaborative. Pour fournir un cadre conceptuel utile afin de mener une analyse de l'activité collaborative, Ellis a établi un trèfle fonctionnel qui définit trois domaines de collaboration, à savoir : la co-production, la coordination et la communication (Ellis, 1994). Sur la base de ce trèfle fonctionnel, nous soulignons dans ce qui suit le potentiel du concept d'espace et des ESQ_L dans l'activité collaborative comme aide à la co-production, à la coordination et à la communication entre les différents acteurs du domaine du bâtiment (Siala, 2016).

2.1.1 Les ESQ_L comme aide à la co-production

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les ESQ_L sont partiellement connues par les concepteurs qui essaient continuellement de les satisfaire. Ces concepteurs ont besoin de retourner au programme architectural (en format numérique ou en format papier) tout au long du processus de conception, pour consulter les ESQ_L afin de pouvoir évaluer la conception,

l'approuver ou la revoir selon sa conformité aux exigences. Cette pratique représente une source de perte de temps et de déconcentration, surtout quand la conception se déroule dans un milieu fortement collaboratif, où de tels types d'informations (qualitatives) risquent d'être facilement perdues durant les échanges, mais aussi durant la mise à jour des versions. Ainsi, enrichir la représentation de l'espace avec les ESQ_L dans l'outil BIM permet d'orienter l'intérêt des concepteurs vers le respect des exigences du programme tout au long du processus de conception. Plus avertis sur les ESQ_L, les concepteurs peuvent co-produire des modèles plus conformes au programme.

2.1.2 Les ESQ_L comme aide à la coordination

La prise en compte des ESQ_L dans la démarche BIM permet d'imaginer une démarche de vérification automatique de la conformité des modèles BIM aux exigences requises afin de faciliter la co-production architecturale en orientant la vision des concepteurs vers les ESQ_L souhaitées. Cette démarche de vérification semble être très utile en phase de conception. Elle guide les concepteurs dans la prise de décision et facilite la communication des non-conformités causées par la mise à jour des versions par rapport aux exigences du programme.

Au cours de l'évolution de la conception, le modèle BIM est continuellement mis à jour par les différents concepteurs, de façon à ce que chacun y introduise les ajustements nécessaires en fonction de ses compétences et de son domaine d'intervention. Dans ce contexte, la démarche de vérification peut assister les concepteurs à identifier les éventuelles modifications apportées aux espaces qui ne respectent pas le programme demandé. Les non-conformités détectées doivent être ensuite signalées aux acteurs concernés pour une nouvelle révision. La vérification des ESQ_L représente ainsi une aide à la coordination et une assurance de l'évolution de la conception sur une voie partagée. Par exemple, au cours de l'avancement de la conception, l'ingénieur en génie civil a placé un poteau dans le mur extérieur d'une salle d'eau, éliminant ainsi l'ouverture prévue. La vérification des ESQ_L permet de mettre en évidence la non-conformité de cet espace relativement à l'exigence d'avoir une ventilation naturelle. L'architecte ou l'acteur responsable de la coordination des études (le BIM manager) peut alors informer l'ingénieur en génie civil de cette non-conformité (au cas où celui-là n'a pas cherché l'information), pour qu'il puisse revoir sa conception dans le respect du programme demandé.

2.1.3 Les ESQ_L comme aide à la communication

L'activité collaborative implique le travail de plusieurs acteurs, chacun avec ses compétences et son domaine d'activité pour aboutir à un objectif commun. Avec l'adoption de la démarche BIM, la conception est devenue une activité de plus en plus collaborative. C'est dans ce contexte que les ESQ_L peuvent instaurer une communication interdisciplinaire entre les différents acteurs. Impliquer les acteurs qui ne participent pas dans la mise en forme des espaces (ex. ingénieurs en génie civil, plomberie, acoustiques, etc.) dans la communication des non conformités aux ESQ_L permet de les sensibiliser au respect du programme et de maintenir une communication continue entre tous les intervenants dans la conception tout au long du processus de conception.

2.2 Limites des formats BIM

Avoir accès aux exigences de programmation est essentiel pour les différents acteurs du domaine du bâtiment. C'est sur la base de ces exigences que les premières propositions de conception sont approuvées ou rejetées. Les exigences spatiales sont utilisées pour faciliter les estimations initiales des coûts de conception et de construction. Après la construction, les gestionnaires de patrimoine ont besoin de ces informations pour pouvoir comprendre l'organisation du bâtiment. Ainsi, la prise en compte des exigences du programme dans la démarche BIM renforce leur partage entre les différents acteurs. L'interopérabilité des données du modèle BIM est assurée par des formats BIM standards.

Différents travaux sont effectués dans l'objectif d'intégrer les exigences spatiales du programme dans les formats BIM (Brucker, 2005) (East E. W., 2007) (East, 2009) (East W. , 2012) (Barekati E. , 2016), soit à travers la création d'un pont entre des formats privés d'outils (outils de programmation architecturale et outils BIM), soit à travers l'intégration dans des formats standards ouverts.

2.2.1 Les ponts entre formats privés

Certaines tentatives d'intégration des exigences spatiales dans la démarche BIM reposent sur la création d'un pont entre deux outils privés, un outil BIM et un outil de programmation architecturale. À titre d'exemples, la société américaine Trelligence¹³ propriétaire de l'outil de

¹³ <http://www.trelligence.com/>

programmation architecturale Trelligence Affinity a développé le plug-in Affinity For Revit¹⁴ qui permet de disposer du format de programmation architecturale Trelligence dans l'environnement de Revit Architecture. Dans une autre tentative, les membres de l'atelier HKS Architects¹⁵, spécialisés dans la conception de bâtiments de soins de santé en Amérique du Nord, utilisent un plug-in Revit Architecture personnalisé qui connecte les modèles Revit qu'ils conçoivent à leur format propriétaire de programmation architecturale. Ces deux efforts d'intégration se sont concentrés sur l'ajout automatique des espaces du programme à la plateforme Revit accompagnées de certaines ESQ_N (ex. quantité, surface).

2.2.2 Les standards ouverts

Les IFC encouragent la création de sous-standards du format IFC par addition de propriétés personnalisées qui répondent aux besoins spécifiques de certains acteurs du domaine du bâtiment. Par exemple, pour l'entité *IfcSpace*¹⁶, le concepteur peut avoir le besoin d'attributs supplémentaires concernant les exigences spatiales. Un ensemble de propriétés personnalisées peut être défini et associé à la classe *IfcSpace*, ce qui crée un sous-standard. Les propositions de sous-standards sont appelées MVD (Model View Definitions) et peuvent être reconnues par les IFC et mises à disposition via le portail BuildingSMART. Plusieurs MVD se sont concentrés sur l'intégration des exigences spatiales, parmi lesquels nous citerons : IFC AR-5, Spatial Compliance Information Exchange (SCIE), Building Programming Information Exchange (BPie) et Universal Format for an Architectural Program Of Requirements (UFPOR).

a- IFC AR-5

IFC AR-5 est l'une des premières extensions des capacités des IFC pour héberger des exigences spatiales (Brucker, 2005). Ce travail porte sur l'intégration des exigences de position *<RequestedLocation>* et de surface d'un espace, à savoir la surface maximale *<MaxRequiredArea>* et minimale *<MinRequiredArea>*, pour des fins de vérification. Les résultats de ce travail ont été intégrés à la version IFC 2x2¹⁷, à travers la nouvelle entité *<IfcSpaceProgram>*.

¹⁴ http://www.trelligence.com/docs/flyer-AffinityForRevit_11-2014.pdf

¹⁵ <http://www.hksinc.com>

¹⁶ Entité dédiée à définir un espace dans le format IFC qui prend en charge tous les attributs communs que peut avoir un espace dans le BIM.

¹⁷ <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases/ifc2x2-release>

b- Construction operations Building Information Exchange (COBie)

COBie est une version simplifiée du format IFC où toutes les informations géométriques sont éliminées. Ce format est principalement utilisé lors de la remise de l'ouvrage au propriétaire. Il permet de capturer les informations non graphiques des phases de conception et de construction pour les convertir dans un seul fichier à fournir aux exploitants du bâtiment. Un fichier COBie ressemble à un tableau géant qui comporte toutes les informations nécessaires à l'utilisation et à l'entretien du bâtiment, qui peut être échangé sous plusieurs formats (ex. Excel, XML). En ce qui concerne les exigences spatiales, le format COBie comporte les informations suivantes (tableau 2) : l'identifiant de l'espace, le niveau souhaité, la localisation, la quantité, le nom, la surface utile (hors œuvres) et la hauteur utile sous plafond (East E. W., 2007).

Name	Type	Reqd/Opt	Description
SpaceID	String	ReadOnly	Space specific ID
SpaceLevelID	Reference	ReadOnly	Building/Facility specific ID
SpaceFacilityID	Reference	ReadOnly	Story specific ID
SpaceLocation	Complex	Opt.	Format to be determined
SpaceNo	String	Opt./Reqd.	Reqd. if a building
SpaceName	String	Required	Name of the space
SpaceUsableArea	Number	Opt.	Usable floor area
SpaceUsableHeight	Number	Opt.	Distance "floor to ceiling"

Tableau 2 Les exigences spatiales incluses dans le format COBie (East E. W., 2007)

c- Spatial Compliance Information Exchange (SCIE)

Le format SCie¹⁸ est un sous-ensemble du standard COBie. Il se concentre sur l'intégration des exigences de surface et fournit des informations encore plus détaillées sur les surfaces (ex. surface nette et surface totale des espaces) (East, 2009). Les exigences spatiales SCie peuvent être fournies dans un fichier COBie ou sous forme de fichier autonome. Elles sont intégrées à la version IFC 2x3 après un traitement supplémentaire visant à extraire les informations nécessaires à la création des feuilles de calcul COBie, à travers le programme ifcCOBie.

¹⁸ https://www.nibs.org/page/bsa_scie

d- *Building Programming Information Exchange (BPie)*

Comparé au format SCie, BPie¹⁹ est un format plus récent qui considère le programme architectural comme un document dynamique qui change tout au long du cycle de vie d'un bâtiment (East W. , 2012). Il vise non seulement l'intégration des exigences spatiales dans les formats BIM, mais aussi leur mise à disposition pour pouvoir ensuite les modifier. Contrairement au format SCie, ce format ne représente pas un sous-ensemble du format COBie, mais plutôt un MVD direct du format IFC. Il fournit un modèle de données plus souple pouvant capturer un plus large éventail d'informations concernant les exigences spatiales. Pour capturer les exigences du programme, ce format s'appuie sur cinq entités différentes, à savoir : <Projet>, <Bâtiment>, <Étage>, <Espace> et <Zone>, auxquels il associe des ensembles de propriétés supplémentaires²⁰.

Bien que les deux derniers formats BIM se sont concentrés uniquement sur des ESQ_N, spécialement celles de surface, le format BPie a fourni un ensemble ESQ_L qui ont été approuvées par les IFC avant d'être intégrées à la version IFC 2x3. Parmi les ensembles de propriétés supplémentaires que ce format définit pour l'entité Espace, on note :

- les exigences formelles composées d'un ensemble d'exigences géométriques (surface nette, hauteur minimale sous-plafond, hauteur minimale sous dalle et longueur minimale) et d'un ensemble d'exigences graphiques sur l'outil BIM, en 2D ou en 3D (ex. point de départ),
- les exigences de 'classification' qui indiquent la catégorie fonctionnelle de l'espace,
- les exigences fonctionnelles communes qui indiquent la fonction de l'espace, si l'espace doit être intérieur ou extérieur et s'il doit être composé (contient plusieurs espaces), simple ou partiel (fait partie d'un espace plus grand),
- les exigences d'occupation (ex. occupants, nombre d'occupants, horaires d'occupation par jour, horaires d'occupation par semaine, surface d'occupation par occupant, etc.),
- les exigences structurelles (ex. charge maximale sur dalle, sur mur, sur plafond, etc.),
- les exigences de revêtement (ex. matériaux de revêtement, épaisseur, hauteur, etc.),
- les exigences d'ouverture (ex. si l'espace doit contenir une fenêtre ouvrable, hauteur, etc.),
- les exigences d'éclairage (ex. éclairage, éclairage direct, éclairage artificiel, etc.),
- des exigences thermiques (ex. température minimale, température maximale, type de chauffage, type de climatisation, etc.),
- les exigences de ventilation (ex. type de ventilation, débit minimum d'air frais, etc.).

¹⁹ https://www.nibs.org/page/bsa_bpie

²⁰ http://iug.buildingsmart.org/idms/information-delivery-manuals/idm-for-building-programming/IDM_exchange_req_building_programming_161111.pdf/view

e- *Universal Format for an Architectural Program Of Requirements (UFPOR)*

Le format UFPOR (Barekati E. , 2016) est l'un des plus récents MVD qui s'intéressent à l'intégration des exigences spatiales au format IFC. Il permet de prendre en compte encore plus d'exigences que les formats précédents et repose sur cinq concepts, dont le concept <Environnement> qui englobe les entités <Projet>, <Bâtiment>, <Étage> et <Zone> du format BPie. En plus de ce concept, le format UFPOR repose également sur les concepts ; Activité, Personne, Besoin et Évaluation (figure 4). Dans ce format, le concept Activités <Activity> relie les exigences spatiales à un environnement social. Les activités décrivent la manière dont les personnes <People> utilisent l'espace. Les Besoins <Need> représentent le concept principal de ce format. Ils peuvent être définis par l'environnement de l'espace, par les personnes qui l'utilisent ou par les activités qui se déroulent à l'intérieur. Étant donné que les ESQ_L sont difficiles à mesurer, ce format les transforme en ESQ_N plus faciles à mesurer (Barekati E. , 2014). L'évaluation des besoins peut se faire directement ou indirectement en interrogeant les autres entités. À l'entité Évaluation <Assessment>, ce format définit les attributs suivants :

- Type : il peut être sous forme nominale, ordinale, intervalle ou ratio,
- Évaluateur : pour l'évaluation nominale ou ordinale, une personne doit être mentionnée. Pour les évaluations sous forme d'intervalle ou de ratio, une équation mathématique de vérification est mentionnée,
- Attributs IFC correspondants : pour les évaluations d'intervalle et de ratio, les attributs IFC correspondants doivent être mentionnés afin d'être utilisés par l'évaluateur pour le calcul du résultat,
- Attributs Revit correspondants : ces attributs doivent être mentionnés également pour être utilisés dans le calcul du résultat,
- Résultat : selon le type de l'évaluation, plusieurs types de résultats peuvent être produits. Le résultat est associé au présent attribut.

Le format UFPOR permet de prendre en compte et de vérifier plusieurs exigences spatiales d'ordre qualitatif. Cependant, contrairement aux formats précédents, il n'a pas pu être intégré au format IFC. Ceci est dû à l'entité Activité <Activity> qui ne correspond à aucune entité du format IFC qui montre dans son état actuel, des limites quant à la description des informations de la phase de programmation architecturale (Barekati E. , 2016).

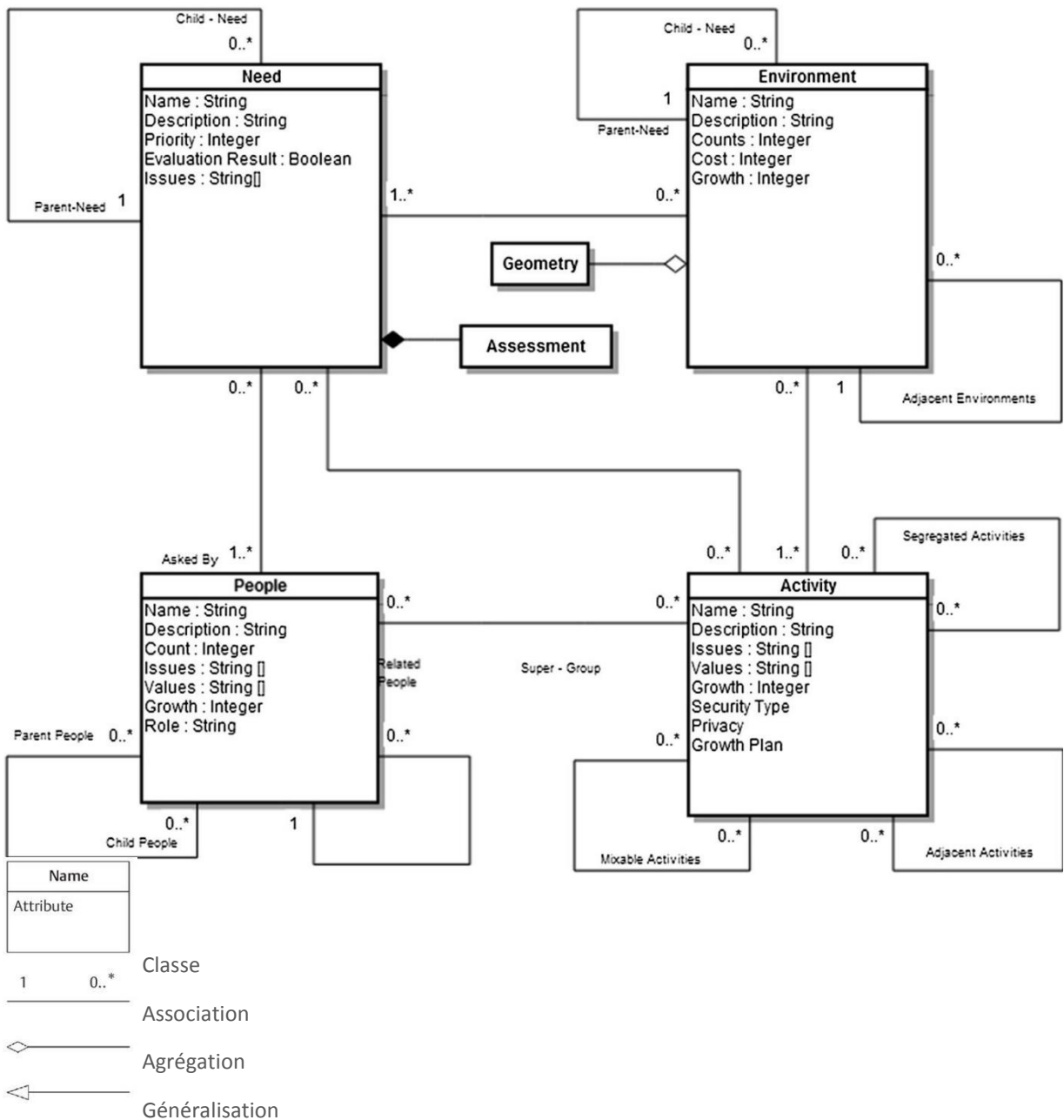


Figure 4 Diagramme UML de base du format UFPO (Barekati E. C., 2014)

2.2.3 Limites des sous-standards BIM et besoin de couverture de plus d'ESQL

La plupart des sous-standards BIM existants ont essayé de résoudre le problème de l'intégration des informations concernant la programmation architecturale dans les formats BIM d'un point de vue essentiellement quantitatif, à l'image des formats IFC AR-5 et SCIE. **Le format BPie représente le seul effort d'intégration incluant certaines exigences spatiales d'ordre qualitatif. Cependant, ce format ne couvre aucune exigence de**

topologie ou d'accessibilité comme celles évoquées dans la section 1.3.2. Quant au format UFPOR, il représente une pertinente alternative pour la prise en compte et la vérification des ESQ_L dans la démarche BIM, mais sa structure présente des divergences avec la structure actuelle du format IFC empêchant ainsi son intégration.

La prise en compte des ESQ_L, et plus particulièrement celles de topologie et d'accessibilité des espaces peut favoriser une démarche BIM qui pourrait :

- s'étaler tout au long du cycle de vie du bâtiment en incluant toute l'information sur le bâtiment, y compris l'information qualitative de la phase de programmation,
- mettre à disposition des concepteurs dans l'outil BIM les exigences spatiales dont ils ont besoin pour la mise en forme de leurs projets et ainsi diminuer par conséquent la perte de temps reliée à consultation du programme,
- fournir aux concepteurs les informations et les mécanismes nécessaires à l'évaluation de la conformité de la conception à travers l'outil BIM,
- permettre d'orienter la vision des concepteurs vers la prise en compte des exigences spatiales d'ordre qualitatif et favoriser, par conséquent, la production de modèles plus conformes au programme demandé.

2.3 Énoncé de la problématique

Les exigences spatiales qualitatives (ESQ_L) jouent un rôle prédominant dans la programmation architecturale, elles décrivent l'organigramme fonctionnel du projet et détaillent les relations souhaitées entre ses différents espaces, leurs caractéristiques de distribution, d'accessibilité et de confort. Avoir accès aux exigences de programmation est très utile tout au long du cycle de vie du bâtiment, particulièrement durant la phase de conception, où les ESQ_L sont indispensables, non seulement pour la mise en forme du projet, mais aussi pour l'évaluation de sa conformité au programme demandé. C'est sur la base de ces exigences que la conception est finalement approuvée, modifiée ou rejetée en partie.

La prise en compte de l'information sur les exigences spatiales d'ordre qualitatif dans les pratiques BIM courantes est actuellement incomplète. Elle reste plus ou moins freinée par la rigidité des formats BIM sous-jacents qui tendent à traduire toute l'information sur le bâtiment en données essentiellement quantitatives. Notamment, le format interopérable IFC qui propose une description très complète des informations du bâtiment pour les phases de conception et de construction, mais qui montre certaines limites quant à la prise en compte des exigences spatiales de la phase de programmation.

De ce fait, pour certains concepteurs et spécifiquement pour les architectes, les pratiques BIM actuelles impliquent un travail de va-et-vient entre l'outil BIM et le programme architectural (en format numérique ou en format papier) pour chercher l'information nécessaire à la mise en forme et à l'évaluation de la conformité de la conception. Cette pratique contraignante nuit à l'avancement du projet en cours de conception et constitue une source considérable de perte de temps et d'information. Elle peut également causer un réel détachement des concepteurs des exigences demandées, au fur et à mesure de l'avancement de la conception. C'est pour cette raison que la prise en compte des ESQ_L dans la démarche BIM représente une problématique d'actualité dans le domaine du bâtiment.

Le présent travail de recherche s'inscrit dans la lignée de la prise en compte des informations de programmation architecturale dans les pratiques BIM courantes. **Notre problématique est de développer une démarche BIM permettant d'abord de prendre en compte et de représenter les ESQ_L dans l'outil BIM et de vérifier ensuite le modèle BIM conçu à ces exigences.**

À cette problématique deux questions fondamentales s'imposent :

- quel serait l'impact d'une telle approche de conception sur les pratiques BIM actuelles ?
- comment fonder une approche de conception qui permette non seulement d'intégrer les ESQ_L dans les outils BIM, mais aussi d'évaluer les modèles BIM en fonction?

2.4 Hypothèses

Relativement au premier questionnement soulevé par notre problématique « *quel serait l'impact d'une telle approche de conception sur les pratiques BIM actuelles ?* », nous sommes amenés à formuler les hypothèses suivantes :

- La prise en compte des ESQ_L dans l'outil BIM et la vérification de la conformité de la conception à ces exigences peuvent assister les concepteurs à produire des modèles BIM plus conformes aux exigences du programme,
- Cette nouvelle approche peut assister les concepteurs à optimiser le temps de conception.

2.5 Objectifs

Relativement au deuxième questionnement soulevé par la problématique « comment fonder une approche de conception qui permette non seulement d'intégrer les ESQ_L dans les outils BIM, mais aussi d'évaluer vérifier les modèles BIM en fonction? », la présente étude a comme objet d'appréhender l'importance des ESQ_L dans la programmation architecturale et de comprendre leur situation dans les pratiques BIM courantes et dans la modélisation des données de bâtiment, pour pouvoir ensuite les représenter et les développer. Ainsi, l'apport de cette étude va consister à :

- identifier les ESQ_L les plus fréquemment utilisées en phase de programmation architecturale,
- déterminer les limites des outils BIM actuels à intégrer les ESQ_L,
- observer et analyser le concept d'espace architectural tel qu'il est représenté par les modèles d'espace existants et analyser la capacité de ces modèles à prendre en compte les ESQ_L,
- spécifier un nouveau modèle d'espace qui prend en compte et structure l'information sur les ESQ_L,
- instancier ce modèle dans un prototype qui permet de concevoir suivant une nouvelle approche de conception permettant d'intégrer et de représenter les ESQ_L dans un outil BIM et de vérifier par la suite la conformité des modèles BIM conçus à ces exigences,
- évaluer l'approche de conception développée et le modèle d'espace sous-jacent à travers une démarche de validation expérimentale.

2.6 Méthode

Conformément aux différents objectifs de recherche mentionnés, nous avons identifié trois principales étapes à suivre. **La première étape** concerne la spécification d'un nouveau modèle d'espace qui prend en compte et qui structure les ESQ_L. Pour ce faire, nous avons défini deux phases d'analyse permettant de collecter les informations concernant les ESQ_L pertinentes à prendre en compte dans ce modèle. Il s'agit d'effectuer tout d'abord une analyse qualitative d'un ensemble de documents de programmation architecturale afin d'identifier les qualitatifs les plus fréquemment utilisés pour décrire les exigences spatiales. Cette identification a pour objectif de proposer une catégorisation et une répartition possible de ces qualitatifs par ordre d'importance. La catégorisation et la répartition des informations sur les ESQ_L sont cruciales à la conceptualisation de ces informations dans un modèle de données. Il

s'agit d'observer ensuite la capacité des différents modèles d'espace existants à prendre en compte les ESQ_L identifiées. Cette deuxième phase a pour but de souligner les limites de ces modèles, mais aussi d'observer et d'analyser leurs spécifications autour du concept d'espace architectural et de positionner notre proposition conceptuelle.

La deuxième étape consiste au développement d'une approche de conception qui permet de prendre en compte et de représenter les ESQ_L dans l'outil BIM et de vérifier ensuite la conformité du modèle de conception par rapport aux exigences intégrées. Cette étape est composée de deux principales phases. La première phase concerne l'analyse de la capacité des outils BIM actuels à prendre en compte les ESQ_L. Cette phase est indispensable à l'identification des limites des outils BIM actuels et pour choisir l'outil le plus performant dans la prise en compte du concept d'espace architectural et de ses exigences, sur lequel l'approche proposée sera mise en œuvre. La deuxième phase porte sur le développement réalisé et la mise au point d'une démarche fonctionnelle permettant d'intégrer les ESQ_L à l'outil BIM sélectionné et de vérifier le modèle de conception en fonction.

La troisième étape porte sur la validation de l'approche développée, pour laquelle nous avons défini deux processus d'évaluation successifs. Il s'agit dans le premier processus d'appliquer un protocole expérimental de validation qui consiste à la mise en œuvre de l'approche développée dans un environnement de conception réel, pour la comparer à l'approche habituelle de conception. L'interprétation des résultats permet ainsi d'évaluer l'apport de l'approche proposée par rapport à une approche habituelle en termes de respect des ESQ_L, mais aussi en termes de gain de temps. Le deuxième processus de validation concerne l'évaluation de l'expérimentation elle-même, grâce à une analyse critique du protocole expérimental et de la démarche fonctionnelle proposée.

DEUXIEME PARTIE :

ÉTAT DE L'ART : SITUATION DES ESQ_L DANS LES PRATIQUES BIM COURANTES

Cette deuxième partie porte sur l'étude de l'état du savoir concernant le concept d'espace architectural en général et l'information décrivant ses exigences spatiales qualitatives en particulier. Elle se compose de trois étapes. Dans la première étape, nous nous intéressons tout d'abord à l'identification des (ESQ_L)les plus fréquemment utilisées pour décrire les espaces en phase de programmation architecturale. Ceci est assuré à travers un travail d'analyse de contenu d'un ensemble de documents de programmation architecturale. Sur la base des types d'exigences identifiés, nous passons dans la deuxième étape à l'étude de la situation du concept d'espace architectural et de ses exigences qualitatives dans les pratiques BIM courantes. Il s'agit d'analyser la capacité de différents outils BIM actuels à prendre en compte l'information sur les espaces et leurs exigences d'ordre qualitatif. La troisième étape concerne l'étude des divers modèles d'espace existants en vue d'identifier leurs limites à prendre en compte les ESQ_L.

Les observations illustrées au niveau de cette partie analytique pourront former la base de la spécification d'un nouveau modèle d'espace qui structure l'information sur les ESQ_L. Ce modèle pourra représenter à son tour, la base d'une nouvelle approche de conception permettant de prendre en compte et de gérer les ESQ_L en phase de conception architecturale.

CHAPITRE 3 :

IDENTIFICATION ET REPARTITION DES EXIGENCES SPATIALES QUALITATIVES (ESQL)

Dans cette étude nous nous concentrons sur l'intégration des ESQL dans les pratiques BIM courantes. Les premières questions que nous nous sommes posées au début de cette étude concernent la définition de ces exigences : « quelles sont les ESQL décrites en phase de programmation architecturale, comment sont-elles décrites et quelles sont celles pertinentes à prendre en compte dans les pratiques BIM actuelles ? ». Pour pouvoir répondre à ces questions, nous nous attardons, dans ce premier chapitre de l'état de l'art, sur l'identification des descripteurs ²¹ utilisés pour décrire les exigences sur les espaces en phase de programmation architecturale. Parmi ces descripteurs nous nous intéressons plus particulièrement à ceux qui sont présents dans différents types de projets.

Ce travail d'identification se base sur la réalisation d'une analyse qualitative effectuée en trois phases sur un ensemble de documents de programmation architecturale (Siala & al. 1. , 2017) (Siala & al. 2. , 2017). Il s'agit dans la première phase de de l'identification et de la catégorisation des mots utilisés dans ces documents pour décrire les exigences sur les espaces. Ensuite, la deuxième phase porte sur l'identification des qualificatifs utilisés et du calcul de leurs fréquences d'apparition dans les documents analysés. La troisième phase porte enfin sur le traitement des données et la représentation des résultats avant de passer à l'interprétation et à la vérification de la stabilité des résultats obtenus. Cette catégorisation des ESQL forme, par la suite, le support sur lequel sera réalisée l'étude de l'état de l'art concernant la situation des ESQL dans les outils BIM actuels, ainsi que dans les différents modèles d'espace existants.

²¹ Nous désignons par **descripteur** d'exigence le mot et le qualificatif qui lui est associé pour décrire une exigence spatiale (ex. la cuisine doit être **en relation** (mot) **couverte** (qualificatif) avec le garage).

3.1 L'analyse de contenu comme méthode de travail

Notre propos dans ce chapitre n'est pas seulement d'illustrer les différentes exigences possibles sur un espace et leurs éventuels descripteurs, mais aussi de discerner celles pertinentes à intégrer dans les pratiques BIM actuelles. Pour ce faire, ce travail repose sur une méthode d'analyse qualitative. Cette méthode a été choisie pour deux raisons, d'abord du fait que les données à recueillir sont des données qualitatives (des descriptions) qui sont également à analyser d'une manière qualitative, de façon à en extraire le sens avant de les transformer en pourcentages ou en statistiques. Les méthodes d'analyse qualitative ont pour objectif de comprendre et d'interpréter des données afin de saisir leur signification. Ce travail peut être entrepris en parallèle avec la collecte des données, en alternant collecte et analyse pour un maximum de validité (Paillé, 2016). Pour faire surgir le sens, les opérations et manipulations présentes dans une analyse qualitative de données peuvent être techniques ou intellectuelles. Les opérations techniques concernent les transcriptions, découpages, mises en tableau, etc. et celles intellectuelles désignent les transpositions de termes en d'autres termes, les regroupements intuitifs de termes, les inductions généralisantes ou les réductions à des formes essentielles d'ensemble de termes.

Notre travail d'analyse alterne entre ces deux types d'opérations, il repose sur des opérations intellectuelles pour identifier les descriptions des exigences sur les espaces et les classer par regroupement suivant des opérations techniques. Parmi les méthodes d'analyse qualitative existantes, notre étude repose sur la méthode d'analyse de contenu qui nous semble être la plus appropriée compte tenu des objectifs de ce travail d'analyse. Cette méthode fournit un ensemble d'instruments méthodologiques fondé sur la déduction et l'inférence pouvant s'appliquer à des discours variés (Wanlin, 2007). Dans la méthode d'analyse de contenu, l'élément essentiel est l'effort d'interprétation qui doit combiner à la fois, rigueur de l'objectivité et fécondité de la subjectivité (Bardin, 1997).

Notre travail d'analyse de contenu s'est organisé autour de trois phases, tel que défini par Wanlin (Wanlin, 2007), à savoir :

- une phase de pré-analyse composée de deux étapes essentielles. La première porte sur la définition du corpus d'étude et la collecte des documents correspondants. La deuxième concerne la lecture des documents collectés pour dégager manuellement les dissemblances et ressemblances des mots utilisés pour décrire les ESQ_L, afin de les regrouper de façon à en constituer des catégories,

- une phase d'identifications et de calcul des fréquences des qualificatifs utilisés pour décrire les mots. Cette phase porte d'abord sur la vérification des catégories des ESQ_L formées au niveau de la pré-analyse, suivie du travail d'identification des qualificatifs. Ensuite, intervient un codage et un comptage des fréquences d'apparition des qualificatifs des ESQ_L dans le corpus, afin d'identifier ceux qui sont répétitifs, et par conséquent, pertinents à prendre en compte dans des pratiques BIM courantes,
- une phase de traitement des données au cours de laquelle les données sont représentées sous forme de diagrammes circulaires répartissant les qualificatifs par ordre d'importance. Les résultats obtenus sont ensuite testés afin de vérifier leur stabilité. Le travail de vérification concerne le calcul des fréquences d'appartitions des qualificatifs identifiés sur un deuxième corpus (corpus 2 = corpus 1 + 1 document). La comparaison des deux résultats pourrait confirmer la stabilité de nos diagrammes de répartition des ESQ_L.

3.2 La pré-analyse

3.2.1 Définition du corpus (travail manuel)

Pour identifier les descripteurs des exigences sur les espaces en phase de programmation architecturale, nous avons analysé un ensemble d'études de programmation architecturale d'ouvrages publics réels. Parmi les documents mis à notre disposition par les agences de programmation contactées²², ceux ayant les descriptions qualitatives les plus détaillées en termes d'ESQ_L ont été privilégiés. Pour collecter le maximum possible de données, nous avons sélectionné des études de programmation appartenant à différents types représentatifs d'ouvrages publics (tableau 3).

A cet ensemble d'études, deux exemples de guides²³ de programmation ont été associés, afin de collecter le maximum possible de descripteurs, ce qui a constitué un corpus final de dix documents (avec une totalité de 1320 pages de textes à analyser). Ces guides concernent la création et la rénovation de musées et les nouvelles organisations de l'architecture

²² Des agences et des bureaux d'architecture qui sont spécialisés en programmation architecturale et domiciliés sur la ville de Nancy.

²³ La conception de certains ouvrages publics particuliers doit obéir à des chartes de programmation techniques, fonctionnelles et de confort, bien spécifiques. Ces dispositions sont décrites dans des guides de programmation qui régissent et alimentent la réalisation des études de programmations de ces ouvrages.

hospitalière, définies respectivement par l'institut national du patrimoine (INP) et le ministère de la Santé et des Solidarités (tableau 4).

	<i>Projet</i>	<i>Ville</i>	<i>Année</i>	<i>Pages</i>
1	<i>Pôle des métiers</i>	Metz	2008	21
2	<i>Médiathèque Estaminet</i> ²⁴	Grenay	2011	88
3	<i>Maternelle de Jean Jaurès</i> ²⁵	Libourne	2012	25
4	<i>Centre de secours</i>	Dieulouard	2013	69
5	<i>Groupe scolaire et extra-scolaire</i>	Vany	2013	175
6	<i>Pouponnière et centre d'accueil parental</i>	Laxou	2015	158
7	<i>Centre de santé multidisciplinaire</i>	Montchanin	2015	139
8	<i>École élémentaire</i>	Saint-Antonin	2016	137

Tableau 3 Projets correspondant aux études de programmations sélectionnées

	<i>Désignation</i>	<i>Institution</i>	<i>Pages</i>
1	<i>La création et la rénovation de musée</i> ²⁶	Institut National du Patrimoine	88
2	<i>Les nouvelles organisations et architectures hospitalières</i> ²⁷	Ministère de la Santé et des Solidarités	244

Tableau 4 Guides de programmation architecturale sélectionnés

3.2.2 Lecture des documents et constitution des grilles de catégorisation (Travail manuel)

Au cours de cette étape, nous avons procédé à la lecture des documents recueillis. Au fur et à mesure de la lecture de chaque document, on a commencé à rassembler manuellement les mots proches ou similaires utilisés pour désigner des exigences sur les espaces, en les rapportant dans des catégories, afin de dresser des grilles de catégorisation. Il s'agissait surtout de :

- regrouper d'abord les mots ayant la même racine sous une même famille. Par exemple, les mots *accès*, *accessible*, *accéder* et *accessibilité* sont regroupés sous la famille « Accès » (tableau 5),

²⁴ https://www.grenay.fr/IMG/pdf/Programme_finalise_Mediatheque_Estaminet_de_Grenay_-_mars_2011.pdf

²⁵ http://www.ville-libourne.fr/fileadmin/user_upload/fichiers/ma_ville/education/pdf/PTD_Programme_general.pdf

²⁶ <http://mediatheque-numerique.inp.fr>

²⁷ <https://solidarites-sante.gouv.fr>

- rassembler ensuite, les familles, par synonymes et antonymes sous une même catégorie. Par exemple, les familles « Accès », « Entrée », « Sortie », « évacuation », etc. sont classées sous la catégorie 'Accessibilité',
- classer enfin les catégories sous différents types selon la nature de l'exigence qu'elles décrivent sur l'espace. Par exemple, la catégorie 'Accessibilité' est classée sous le type des 'Exigences d'accessibilité', alors que les catégories de 'Relation' entre les espaces, de 'Disposition' et de 'Distribution' sont regroupées sous le type des 'Exigences de topologie' (tableau 6).

EXIGENCE			
Type	Catégorie	Famille	Mot
Accessibilité	Accessibilité	Accès	<i>accès</i> <i>accessible</i> <i>accéder</i> <i>accessibilité</i>
		Entrée	<i>entrée</i> <i>entrées</i>
		Sortie	<i>sortie</i> <i>sorties</i>
		Evacuation	<i>évacuation</i> <i>évacuer</i>
		Passage	<i>passage</i>

Tableau 5 Grille de catégorisation du type des exigences d'accessibilité

EXIGENCE				
Type	Catégorie	Famille	Mot	
Topologie	Relation	Liaison	<i>liaison</i> <i>lié</i>	
		Relation	<i>relation</i> <i>relié</i> <i>séparation</i>	
		Distribution	Distribution	<i>distribution</i> <i>distribué</i>
		Circulation		<i>circulation</i> <i>circuler</i> <i>va et vient</i>
		Disposition	Proximité	<i>proximité</i> <i>proche</i>
			Contiguïté	<i>contiguïté</i>

Tableau 6 Grille de catégorisation du type des exigences de topologie

Cette étape de catégorisation nous a permis d'identifier et d'appréhender les différents types d'ESQL. Ainsi cinq types d'exigences ont été identifiés, à savoir :

- les 'Exigences d'occupation' (ex. type d'activité, équipement),
- les 'Exigences de revêtement' (ex. revêtement horizontal, revêtement vertical),
- les '**Exigences d'accessibilité**' héritant le nom de son unique catégorie d'exigences (tableau 3),
- les '**Exigences de topologie**', rassemblant les catégories d'exigences de 'Disposition', de 'Relation' et de 'Distribution' des espaces (tableau 4),
- les '**Exigences de confort**', regroupant les catégories d'exigences 'Lumineuses', 'Thermiques', 'Hygrométriques', 'Acoustiques' et enfin 'De sécurité' (tableau 7).

Nous focalisons au niveau de ce travail de recherche sur l'étude des ces trois derniers types d'ESQL, à savoir : les exigences d'accessibilité, de topologie et de confort, étant donné que les exigences d'occupation et celles de revêtement sont prises en compte par les formats BIM actuels (notamment par le format IFC).

EXIGENCE				
Type	Catégorie	Famille	Mot	
De Confort	Thermique	Climatisation	<i>climatisation</i> <i>climatisé</i>	
		Chauffage	<i>chauffage</i> <i>chauffé</i>	
		Rafraîchissement	<i>rafraîchissement</i>	
	Acoustique	Acoustique	<i>Acoustique</i>	
		Phonique	<i>phonique</i> <i>sonore</i>	
	Lumiseuse	Éclairage	<i>éclairage</i> <i>éclairé</i>	
		Lumière	<i>lumière</i>	
		Esoleillement	<i>enseleillé</i> <i>enseillement</i>	
	Hygrométrique	Ventilation	Ventilation	<i>ventilation</i> <i>VMC</i> <i>extraction</i> <i>hygrométrie</i>
			Sécurité	<i>sécurité</i> <i>intrusion</i> <i>incendie</i>
Secours			<i>secours</i>	

Tableau 7 Grille de catégorisation du type des exigences de confort

3.3 Identification des qualificatifs et calcul de leurs fréquences d'apparition

Cette phase consiste d'abord à la vérification de la catégorisation des exigences établie dans la phase précédente. Elle porte ensuite sur l'identification des différents qualificatifs utilisés pour décrire ces exigences. Ces qualificatifs sont par la suite regroupés selon leur sens, mais aussi selon leur nature avant de passer aux opérations de calcul des fréquences de leur apparition dans le corpus étudié. Ces fréquences permettent de discerner les qualificatifs, et par conséquent, les descripteurs (mot + qualificatif) les plus fréquemment utilisés pour décrire les ESQ_L en phase de programmation architecturale. Ces descripteurs désignent ainsi les ESQ_L pertinentes à prendre en compte dans les pratiques BIM actuelles.

3.3.1 Vérification des grilles et identification des qualificatifs (travail semi-automatique)

Cette phase est réalisée à l'aide du logiciel d'analyse qualitative de données²⁸ NVivo 11²⁹. Nous avons procédé à la réalisation d'une recherche textuelle pour chaque mot identifié manuellement. Ce logiciel permet de gérer les spécialisations, les généralisations et les mots lexicaux du mot recherché et offre un affichage des résultats sous forme de synapsie³⁰ synthétisant schématiquement les propos dans lesquels le mot est cité dans l'ensemble du corpus. La figure 5 montre un exemple d'une simple synapsie obtenue par la recherche du mot *accès*, exécutée uniquement sur la première étude de la programmation du corpus. L'exécution de la même recherche sur l'ensemble du corpus de l'étude engendre une synapsie beaucoup plus volumineuse.

L'observation de la synapsie de chaque recherche a permis de détecter d'abord de nouveaux mots à travers les synonymes, les spécialisations, les généralisations et les mots lexicaux proposés par l'outil. Ces nouveaux mots ont servi pour alimenter manuellement les grilles de catégorisation et pour vérifier ensuite le regroupement des mots en familles, des familles en catégories et des catégories en types. L'observation des synapsies a permis également d'identifier manuellement les qualificatifs utilisés pour décrire les mots recherchés.

²⁸ Logiciel qui permet de catégoriser des données, de trier des thèmes et des attributs, de calculer des fréquences, etc. sur la base de données textuelles, graphiques ou encore vidéos.

²⁹ www.qsrinternational.com

³⁰ Terme proposé par Emile Benveniste (Moïnfar, 1975), distinct de *composition* et de *syntagme*, pour désigner le mode de formation des mots.

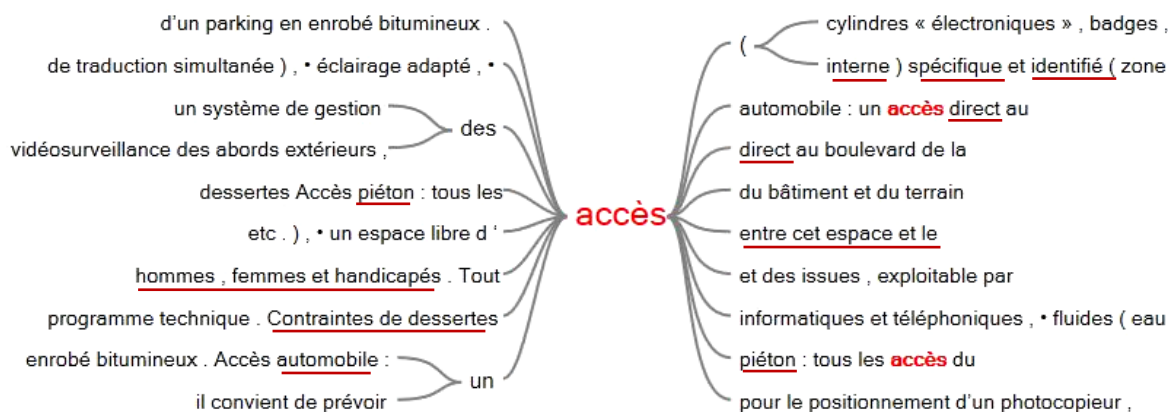


Figure 5 Synapsie engendrée par la recherche du mot *accès* dans l'étude de programmation du Pôle des métiers de Metz.

Les qualificatifs identifiés sont ensuite regroupés de façon à construire une représentation condensée et simplifiée avant de les intégrer aux grilles de catégorisation. Ils ont d'abord été répartis en qualificatifs individuels ou en groupements de qualificatifs ayant le même sens (ex, *contrôlé et sécurisé, de service et de livraison*), ou ayant un sens opposé (ex. *principal/ secondaire, intérieur/ extérieur*). Ces qualificatifs et groupements de qualificatifs sont ensuite rassemblés selon leurs natures de description, qu'elles indiquent le type du mot décrit, une caractéristique ou encore une contrainte. Le tableau 8 montre la grille de catégorisation des exigences d'accessibilité avec détails des descripteurs (qualificatifs ou groupement de qualificatifs) avec les natures correspondantes. Par exemple, le groupement de qualificatifs (*principal / secondaire*) décrit le type d'accès (nature de qualificatif : type, mot décrit : accès). Les grilles de catégorisation des exigences de topologie et de confort sont montrées à l'annexe 1.

EXIGENCE			DESCRIPTEUR			
Type	Catégorie	Famille	Mot	Nature	Qualificatif (s)	
Accessibilité	Accessibilité	Accès	<i>accès</i>	Type d'accès	<i>principal / secondaire</i>	
			<i>accessible</i>		<i>intérieur / extérieur</i>	
			<i>accéder</i>	Caractéristique	<i>depuis</i>	
			<i>accessibilité</i>	Contraintes	<i>type de points d'accès</i>	
			Entrée	<i>entrée</i>	Type d'entrée	<i>direct / indirect</i>
				<i>entrées</i>	Caractéristique	<i>facile, aisé, rapide</i>
			Sortie	<i>sortie</i>	Type de sortie	<i>privé / public</i>
				<i>sorties</i>	Caractéristique	<i>à proximité de</i>
			Evacuation	<i>évacuation</i>	Type d'évacuation	<i>sécurisé, contrôlé</i>
				<i>évacuer</i>	Caractéristique	<i>de secours, de service, de livraison</i>
			Passage	<i>passage</i>	Type de passage	<i>indépendant</i>
					Contrainte	<i>réglementaire, normes usagers, handicapés</i>

Tableau 8 Grille de catégorisation des exigences d'accessibilité avec détails des descripteurs

3.3.2 Calcul des fréquences d'apparition des qualificatifs (Travail automatique)

En deuxième lieu, nous avons réalisé durant cette deuxième phase des opérations de codage et de comptage des fréquences d'apparition des qualificatifs identifiées. L'objectif de ce travail est de déterminer l'ordre d'importance de chaque nature de qualificatif (type, contrainte et caractéristique) pour chaque catégorie d'exigences et d'en déduire, par la suite, l'ordre d'importance de chaque catégorie d'exigences dans le type d'ESQL auquel elle appartient.

Nous avons commencé par la préparation des grilles de catégorisation au travail de calcul des fréquences. Les qualificatifs ayant un caractère subjectif ou ambigu ont d'abord été supprimés des grilles. Ils s'agit des qualificatifs qui sont purement subjectifs et qui ne peuvent en aucun cas aider le concepteur dans la prise de décision, à l'image de ceux décrivant les caractéristiques de l'entrée (*entrée facile, aisée, rapide, etc.*) et ceux décrivant les caractéristiques de la climatisation (*climatisation adaptée, optimisée, etc.*). Ensuite, les grilles de catégorisation obtenues ont été fusionnées dans une seule grille d'analyse (annexe 2), formant le support du travail de calcul des fréquences. Après, le calcul de la fréquence d'apparition de chaque qualificatif dans l'ensemble du corpus de l'étude a été exécuté automatiquement à l'aide du logiciel Nvivo. Les fréquences obtenues sont notées manuellement dans la grille d'analyse (en faisant le cumul des fréquences pour les groupements de qualificatifs. L'ordonnement des fréquences d'apparition obtenues permet de déduire l'ordre d'importance de chaque nature de qualificatif (type, contrainte ou caractéristique) dans le type d'exigence correspondant.

3.4 Traitement des données, interprétation et vérification des résultats

3.4.1 Traitement des données (travail automatique)

Sur la base de la grille d'analyse obtenue à la fin de la deuxième phase, nous avons procédé durant cette phase à un calcul du pourcentage mesurant l'apparition de chaque qualificatif (ou groupement de qualificatifs) dans la nature de description correspondante. Ces pourcentages sont rapportés dans la grille (tableau 9), devant les qualificatifs, permettant ainsi de construire une première représentation de l'ordre d'importance des natures de description utilisées (type, contrainte ou caractéristique) dans chaque catégorie d'exigences. Le pourcentage calculé pour chaque catégorie d'exigences a permis de définir l'ordre d'importance de celles-ci dans les types d'exigences identifiés. Par exemple, les exigences d'accessibilité les plus

fréquemment décrites dans les documents de programmation analysés concernent le type d'accès (65%), spécifiquement les qualificatifs *principal/ secondaire* (46%) et *intérieur/extérieur* (32%).

EXIGENCE				DEDESCRIPTEUR					
Type	Catég.	Freq.	%	Nature	Freq.	%	Qualificatif (s)	Freq.	%
EXIGENCES D'ACCESSIBILITÉ	Accessibilité	463	100%	Type d'accès	303	65%	<i>principal / secondaire</i>	138	46%
							<i>intérieur / extérieur</i>	96	32%
							<i>direct / indirect</i>	12	4%
				Caractéristique	77	17%	<i>privé / public</i>	22	7%
							<i>sécurisé, contrôlé</i>	29	10%
							<i>indépendant</i>	6	2%
				Contrainte	83	18%	<i>depuis</i>	37	48%
							<i>à proximité de</i>	23	30%
							<i>de secours, de service, de livraison</i>	2	3%
EXIGENCES DE TOPOLOGIE	Relation	95	33%	Type de relation	67	71%	<i>type de points d'accès usagers, handicapés</i>	2	2%
							<i>réglementaire, normes</i>	77	93%
				Caractéristique	28	29%	<i>visuelle</i>	13	46%
	Distribution	77	26%	Type	48	62%	<i>physique / virtuelle</i>	2	7%
							<i>avec extérieur</i>	13	46%
							<i>fréquente / occasionnelle</i>	20	42%
				Caractéristique	13	17%	<i>horizontale / verticale</i>	23	48%
							<i>publique / privée</i>	2	4%
							<i>intérieure</i>	3	6%
Contrainte	16	21%	<i>propre / sale</i>	13	100%				
			<i>séparation H/F, usagers</i>	14	88%				
			<i>réglementaire, normes</i>	2	13%				
Disposition	120	41%	Contrainte	120	100%	<i>à proximité de /loin de, proche de</i>	89	74%	
						<i>contiguë à, contiguës</i>	11	9%	
						<i>fait partie de/ composé de</i>	20	17%	
Thermique	90	7%	Type	6	7%	<i>chaufferie bois, chauffe-eau, électrique</i>	6	100%	
						Contrainte	84	93%	<i>climatisé / non climatisé, chauffé / non chauffé, isolé</i>
									<i>règlementation, normes</i>
Acoustique	141	11%	Contrainte	141	100%	<i>règlementation, normes</i>	138	98%	
						<i>avec espace</i>	3	2%	

EXIGENCES DE CONFORT								
Lumiseuse	688	55%	Type	577	84%	<i>naturel / artificiel</i>	363	63%
						<i>zénithal</i>	3	1%
						<i>direct / indirect</i>	34	6%
						<i>intérieur / extérieur</i>	13	2%
						<i>homogène / ponctuel</i>	105	18%
						<i>fluorescent</i>	12	2%
						<i>ensellement direct</i>	45	8%
						<i>diurne, nocturne</i>	2	0%
			Contrainte	10	1%	<i>règlementation, normes</i>	10	100%
			Caractéristique	101	15%	<i>éclairé / non éclairé</i>	3	3%
						<i>de secours, de sécurité</i>	18	18%
						<i>Couleur</i>	2	2%
						<i>décorative, d'ambiance</i>	78	77%
Hygrométrie	279	22%	Type de ventilation	223	80%	<i>naturelle / mécanique</i>	202	91%
						<i>diurne / nocturne</i>	19	9%
						<i>primaire / secondaire</i>	2	1%
			Contrainte	56	20%	<i>règlementation, normes</i>	56	100%
Sécurité	56	4%	Contrainte	56	100%	<i>règlementation, normes</i>	56	100%

Tableau 9 Grille d'analyse des ESQ_L et calcul des fréquences d'apparition des qualificatifs

3.4.2 Représentation des résultats (Travail manuel)

Cette étape du travail d'analyse est certainement la plus intéressante puisqu'elle permet d'avoir une vue d'ensemble des résultats. Elle consiste à la représentation des données concernant chaque type d'exigences identifié sous forme de diagramme circulaire pour mettre en évidence l'importance de chaque portion (catégorie d'exigences). Du centre vers l'extérieur, ces diagrammes schématisent la répartition des catégories de chaque type d'exigence par ordre d'importance (ordre décroissant), suivant les pourcentages calculés (figure 6). Ils répartissent ensuite les natures des qualificatifs de chacune de ces catégories d'exigences par ordre d'importance et énumèrent enfin les qualificatifs (ou groupement de qualificatifs) de chaque nature. Pour discerner les qualificatifs (et les groupements de qualificatifs) les plus fréquemment utilisés dans le corpus étudié dans chaque type d'exigences, nous avons défini un seuil d'acceptabilité de 5%, au-dessous duquel les qualificatifs sont considérés comme non significatifs.

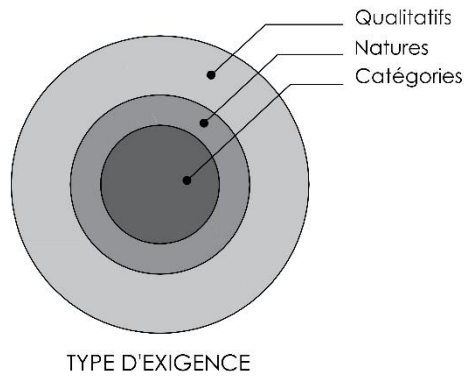


Figure 6 Le diagramme circulaire comme forme de représentation de la répartition des données de chaque type d'exigences par ordre d'importance

Trois diagrammes sont obtenus, à savoir un diagramme pour chaque type d'exigences identifié :

- le diagramme de répartition des exigences d'accessibilité (figure 7),
- le diagramme de répartition des exigences de topologie (figure 8), et enfin
- le diagramme de répartition des exigences de confort (Figure 9).

Le diagramme de répartition des exigences d'accessibilité (figure 7) montre que les descripteurs les plus fréquemment utilisés dans le corpus analysé portent sur le type d'accès et concernent par ordre d'importance les qualificatifs suivants : (*principal / secondaire*), *puis* (*intérieur / extérieur*), *ensuite* (*sécurisé ou contrôlé*) et enfin (*public/ privé*). Par la suite viennent les descripteurs concernant les contraintes d'accès qui définissent principalement les *usagers* autorisés à accéder aux espaces. Pour arriver à ceux portant sur les caractéristiques de l'accès mentionnant par ordre d'importance les qualificatifs suivants : *depuis* quel espace doit se faire l'accès, à *proximité de* quel espace et si l'accès doit être *de service*.

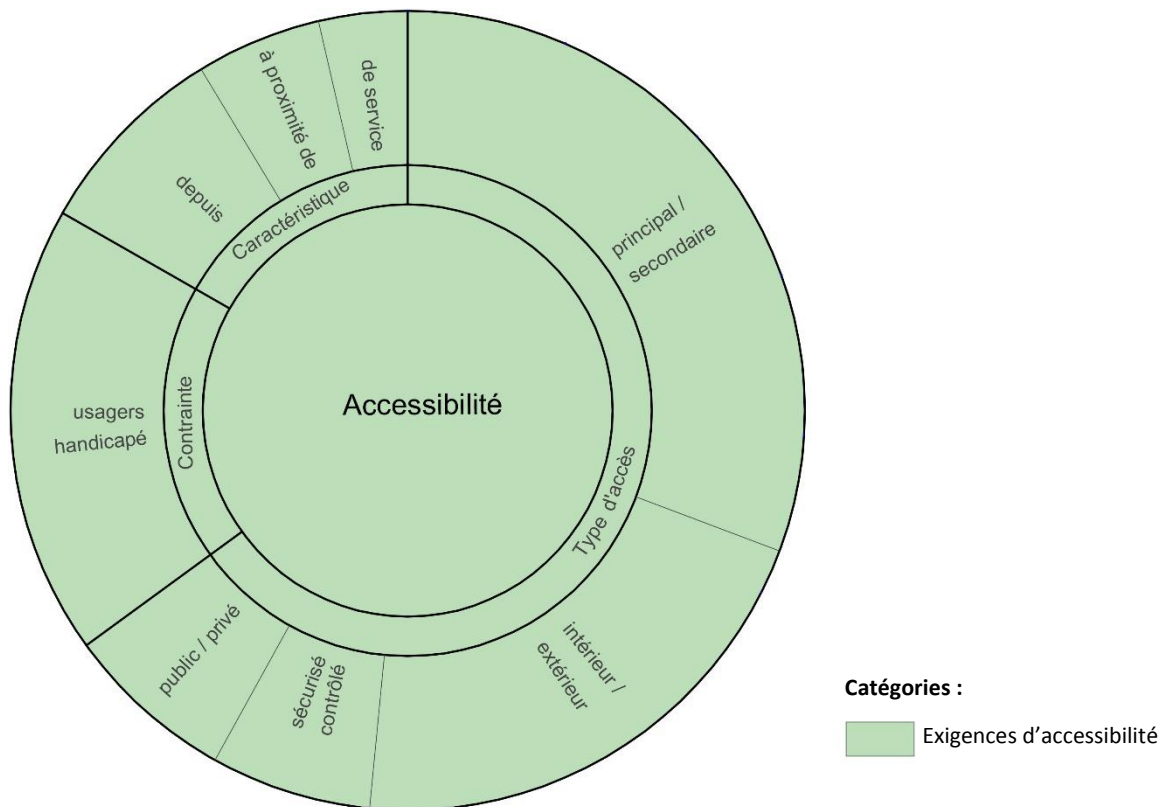


Figure 7 Diagramme de répartition des exigences d'accessibilité

Le diagramme de répartition des exigences de topologie (figure 8) montre un schéma divisé en trois catégories d'exigences réparties par ordre d'importance, à savoir : les exigences de 'Disposition' (41%), celles de 'Relation' (33%), puis celles de 'Distribution' (26%). Les descripteurs de la catégorie de disposition portent sur les contraintes d'arrangement les uns par rapport aux autres. Ces descripteurs concernent par ordre d'importance : la proximité des espaces (*à proximité de / loin de*), leur décomposition (*fait partie de / est composé de*) et leur contiguïté (*contiguë à*). Quant aux descripteurs de la catégorie de relations entre les espaces, ils portent en premier lieu sur le type de la relation (*directe / indirecte* et *principale / secondaire*), puis sur ses caractéristiques (*visuelle, avec extérieur, physique/virtuelle*). Enfin, les descripteurs de la catégorie de distribution des espaces concernent en majorité le type de distribution à prévoir (*horizontale/ verticale, fréquente / occasionnelle, intérieure, publique / privée*), avant ses contraintes (*usagers, normes*) et ses caractéristiques (*propre / sale*³¹).

³¹ La cuisine d'un restaurant doit avoir deux différentes distributions pour le personnel, une distribution « propre » depuis la salle à manger et une distribution « sale » depuis la cour de service. Ces deux circuits ne doivent pas se croiser.

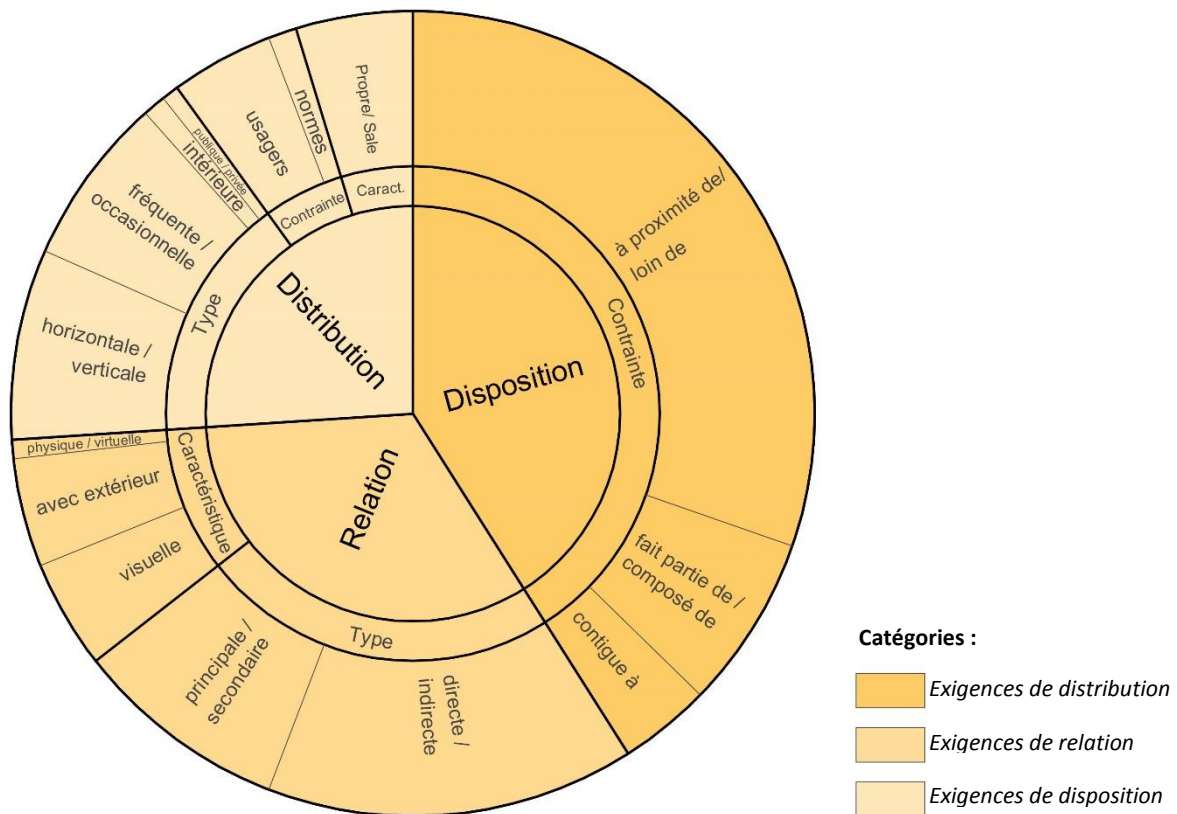


Figure 8 Diagramme de répartition des exigences de topologie

Le diagramme de répartition des exigences de confort (figure 9), montre un schéma divisé en cinq catégories d'exigences selon l'ordre d'importance comme suit : les exigences lumineuses (55%), celles hygrométriques (22%), ensuite celles acoustiques (11%), thermiques (7%) et enfin celles de sécurité (4%). Les descripteurs de la catégorie des exigences lumineuses portent principalement sur le type d'éclairage souhaité, pour lequel les qualificatifs les plus fréquemment utilisés concernent par ordre d'importance : l'éclairage (*naturel / artificiel*), (*homogène/ ponctuel*), (*ensoleillement*) et (*direct / indirect*). Puis, les caractéristiques de l'éclairage (*décoratif, d'ambiance, de sécurité, etc.*). Les descripteurs de la catégorie des exigences hygrométriques portent en majorité sur le type de ventilation souhaité (*naturelle/ mécanique, nocturne/ diurne*). Elles portent ensuite sur les contraintes hygrométriques qui concernent essentiellement les réglementations et les normes à appliquer. Enfin, les descripteurs des catégories des exigences acoustiques, thermiques et de sécurité sont remarquablement minimes comparés aux autres et portent sur les contraintes réglementaires. En plus des contraintes réglementaires, les descripteurs des exigences thermiques concernent principalement les qualificatifs indiquant le traitement thermique souhaité pour l'espace (*climatisé, chauffé*).

Le faible pourcentage mesurant les exigences acoustiques, thermiques et celles de sécurité peut être expliqué par le rôle de la réglementation dans ces catégories d'exigences. Plus la catégorie d'exigences est soumise à des réglementations ou des normes bien spécifiques, moins elle est décrite dans les documents de programmation architecturale.

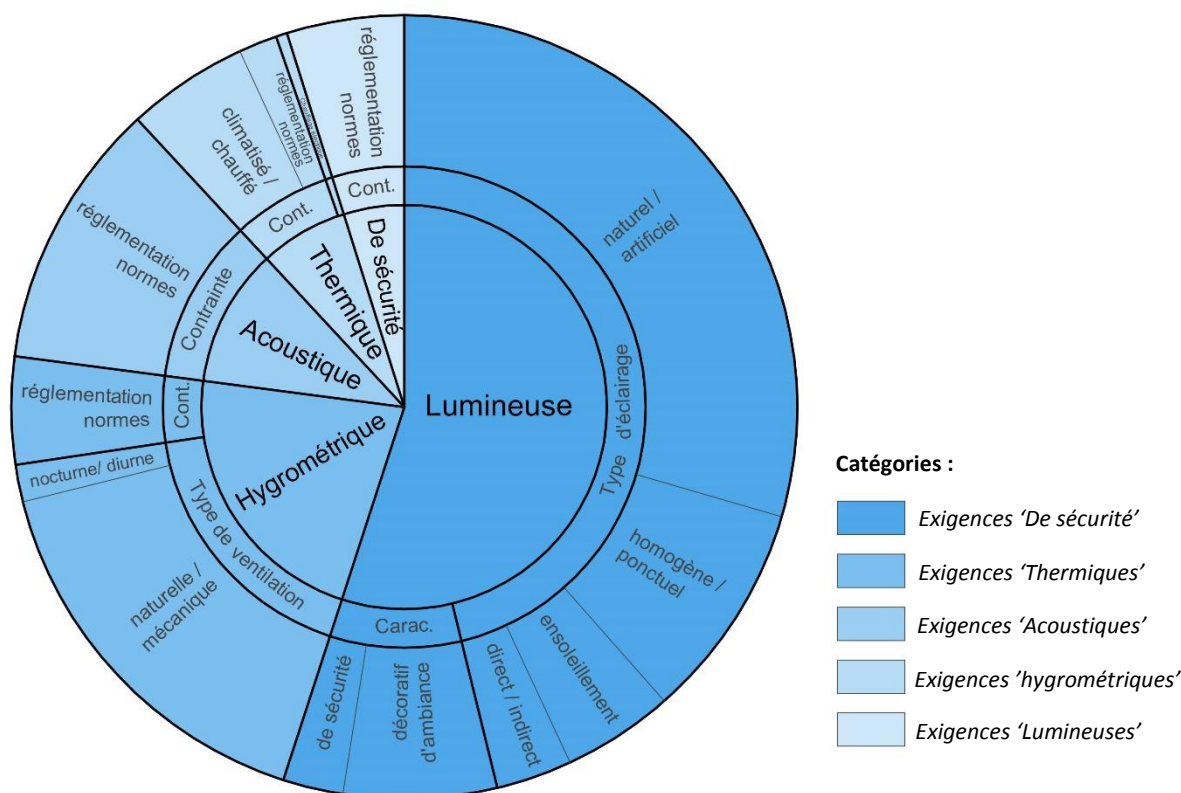


Figure 9 Diagramme de classification des exigences de confort

3.4.3 Interprétation des résultats (Travail automatique)

Pour pouvoir discerner les natures des qualificatifs d'exigences spatiales les plus fréquemment utilisées en phase de programmation architecturale. Nous avons synthétisé dans des histogrammes le pourcentage mesurant les qualificatifs portant sur les types, les contraintes et les caractéristiques pour chaque type d'exigences identifié (figure 10). Cet histogramme montre que les qualificatifs précisant le type sont les plus fréquemment utilisés pour décrire les exigences d'accessibilité et de confort. Ils représentent 65% des qualificatifs des exigences d'accessibilité, indiquant le type d'accès (*principal / secondaire, intérieur / extérieur, etc.*) et environ 65% également de celles de confort précisant particulièrement les types d'éclairage (*naturel/ artificiel, homogène / ponctuel, etc.*) et de ventilation (*naturelle/*

mécanique, nocturne/ diurne, etc.) souhaités à l'intérieur des espaces. Tandis que, pour décrire les exigences de topologie les qualificatifs précisant les contraintes sont plutôt les plus fréquemment utilisés (47%), portant essentiellement sur les contraintes de disposition des espaces (*à proximité de/ loin de, fait partie de/ composé de, contiguë à*). Suivis des qualificatifs précisant le type (39%) indiquant essentiellement les types de relation entre espaces (*directe/ indirecte, principale/ secondaire*) et leurs types de distribution (*horizontale/ verticale, fréquente/occasionnelle*).

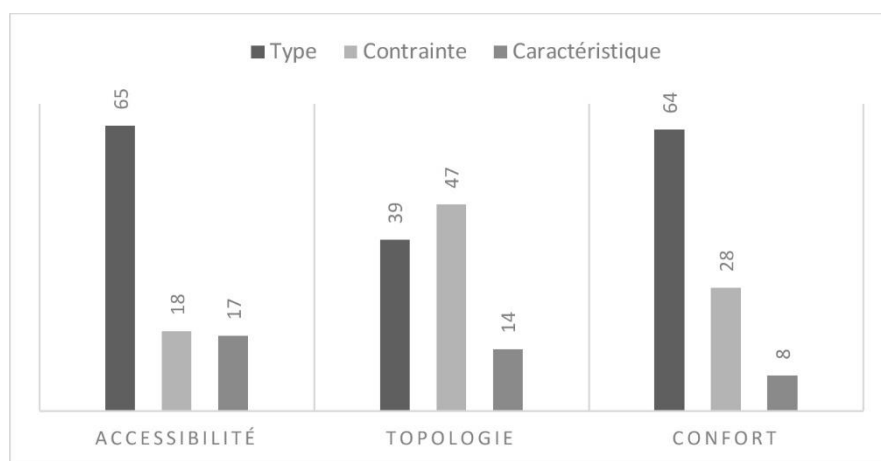


Figure 10 Natures des descriptions illustrées dans les exigences d'accessibilité, de topologie et de confort et récapitulation des pourcentages mesurant les natures des descriptions dans les ESQ_L.

Une dernière étape s'avère nécessaire pour vérifier la stabilité de ces résultats. Il s'agit de vérifier si nos diagrammes de répartition des ESQ_L restent bien invariables en ajoutant un nouveau document de programmation architecturale au même corpus.

3.4.4 Vérification des résultats (travail automatique)

Notre méthode de vérification de la stabilité des résultats consiste au calcul des fréquences d'apparition des qualificatifs de notre grille d'analyse sur un deuxième corpus. Ce deuxième corpus est constitué du premier corpus avec un nouveau document de programmation architecturale (Corpus 2 = corpus 1 + 1 document). Le nouveau document ajouté concerne la construction du Collège Elsa Triolet de Thaon les Vosges. Un projet basé sur une étude de programmation bien détaillée en ESQ_L (201 pages).

Après avoir constitué notre deuxième corpus sur NVivo, nous avons procédé au calcul automatique des fréquences d'apparition des qualificatifs dedans, en les rapportant manuellement dans la grille d'analyse des ESQ_L. Le calcul automatique des pourcentages mesurant ces fréquences est ensuite calculé automatiquement sur la même grille (annexe 3). Les pourcentages obtenus sont proches et dans la plupart des cas même statistiquement identiques à ceux du corpus d'étude (moyennant une différence de 1%).

Pour évaluer la stabilité de ces résultats, l'écart entre les pourcentages mesurant l'apparition des qualificatifs dans les deux corpus est vérifié à travers l'emploi d'un test T³² à variables indépendantes. Ce test repose sur la formulation de deux hypothèses statistiques (hypothèse nulle et hypothèse alternative) et permet de prendre une décision statistique d'accepter ou de rejeter l'hypothèse nulle. L'emploi de cette technique est assuré à travers l'utilisation du logiciel IBM SPSS³³ qui permet de comparer les moyennes de deux groupes concernant une variable donnée, tout en indiquant la valeur de signification. La valeur de signification³⁴ permet de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse nulle de la manière suivante : Si $P > 0,05$, l'hypothèse nulle est acceptée => il n'existe pas de différence significative. Si $P < 0,05$ => l'hypothèse nulle est rejetée => il existe une différence significative entre les deux groupes. Dans notre cas, l'emploi du test T a permis d'accepter l'hypothèse nulle et d'admettre qu'il n'existe pas de différence significative entre les fréquences d'apparition de chaque qualificatif dans les deux corpus. Les valeurs de signification obtenues varient entre 0,06 et 0,46.

Afin de mettre en évidence graphiquement la stabilité de nos diagrammes de répartition des ESQ_L, les résultats du deuxième corpus ont été représentés, à leur tour, sous forme de diagrammes. La superposition des diagrammes obtenus et ceux du premier corpus permet de discerner visuellement les ressemblances et les écarts entre les deux répartitions. La superposition des diagrammes des exigences d'accessibilité (figure 11) montre que malgré la faible augmentation (1%) de la portion du type d'accès, notre répartition des natures des qualificatifs des exigences d'accessibilité par ordre d'importance est maintenue.

³² Ou *test de Student*, un ensemble de tests statistiques paramétriques définis par William Gosset (pseudonyme Student) en 1908 (Student, 1908). Ces tests permettent de comparer les moyennes de deux groupes d'échantillons pour savoir si les moyennes des deux groupes sont significativement différentes au point de vue statistique.

³³ <https://www.ibm.com/analytics/fr/fr/technology/spss/>

³⁴ Ou *P*, probabilité ou risque d'erreur en déclarant qu'il existe une différence entre deux groupes, fixé par la loi de Student à 0.05 en sciences humaines.

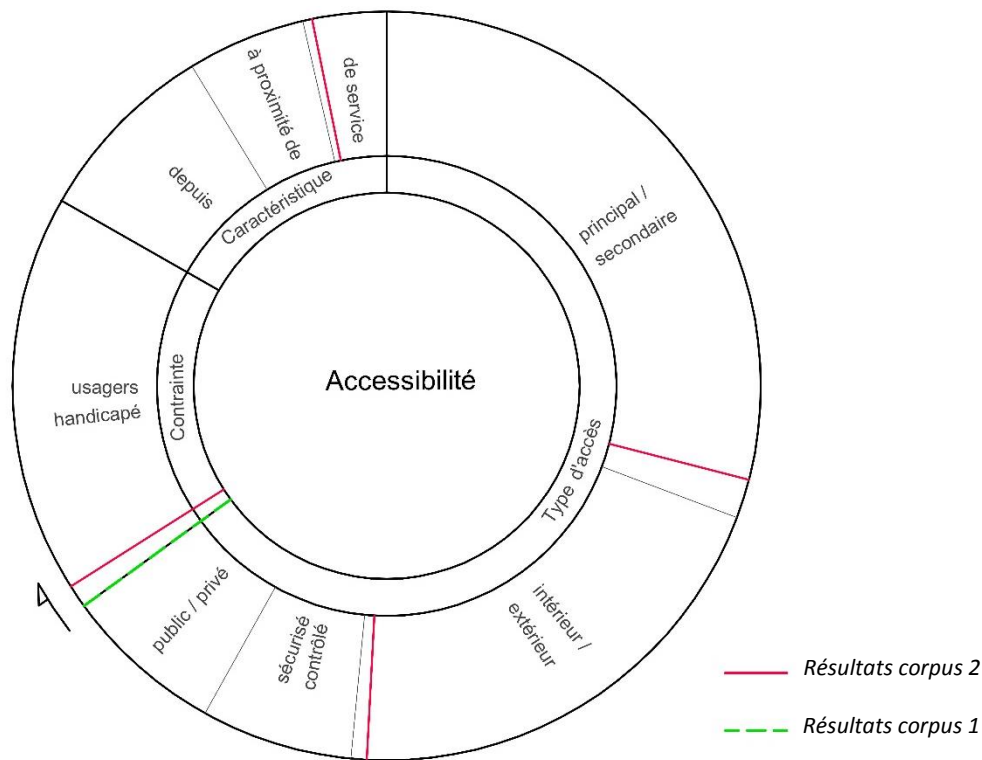


Figure 11 Superposition des diagrammes de répartition des exigences d'accessibilité

La superposition des diagrammes des exigences de topologie (figure 12) montre que la répartition des catégories d'exigences par ordre d'importance est maintenue, malgré certains écarts insignifiants des portions tendant à fournir une division plus équitable en trois catégories. Ce schéma montre également que notre répartition des qualificatifs par ordre d'importance est maintenue, moyennant certains écarts insignifiants. Quant à la superposition des diagrammes des exigences de confort (figure 13), elle montre que notre répartition des catégories d'exigences par ordre d'importance est également maintenue, moyennant une faible augmentation de la portion des exigences lumineuses en faveur du type d'éclairage. Cette augmentation ne peut que confirmer l'importance des exigences lumineuses et spécialement celles portant sur le type d'éclairage dans les exigences de confort.

Cette étape de vérification a démontré la stabilité de nos résultats et de valider nos diagrammes de répartition des ESQ_L. Ce constat tend à valider la méthode d'analyse de contenu employée, car même si les résultats d'une analyse qualitative ne peuvent pas être toujours conformes quelque soit le corpus étudié, nous sommes arrivés à des résultats stables dans l'ordre d'importance des ESQ_L.

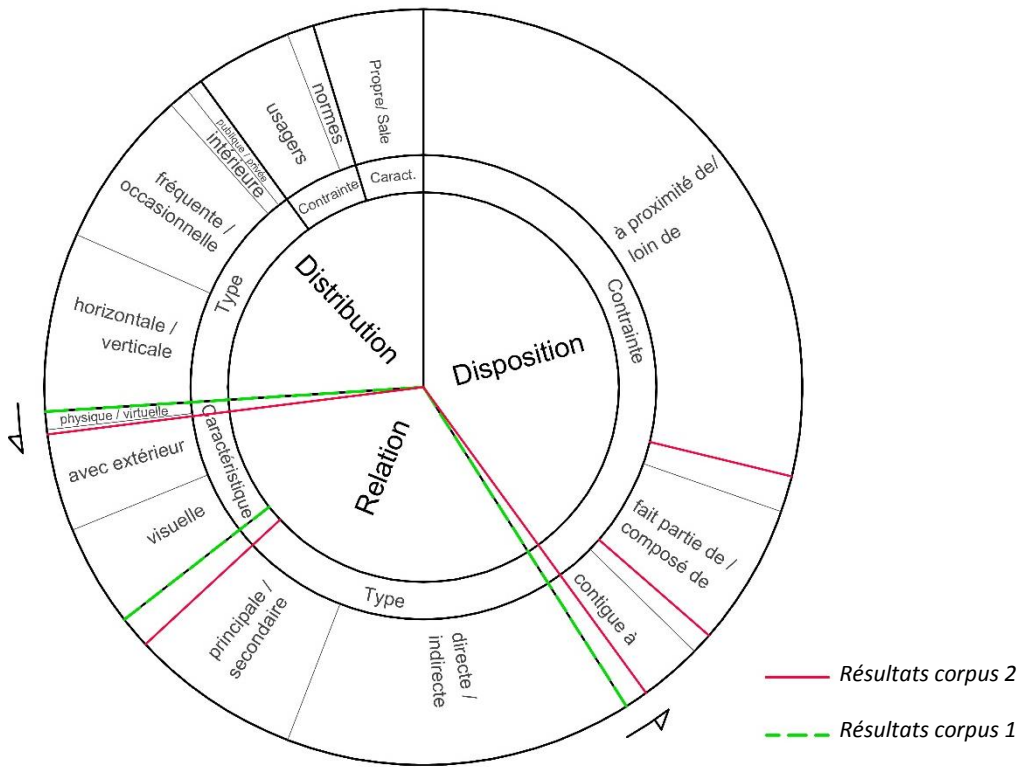


Figure 12 Superposition des diagrammes de répartition des exigences de topologie

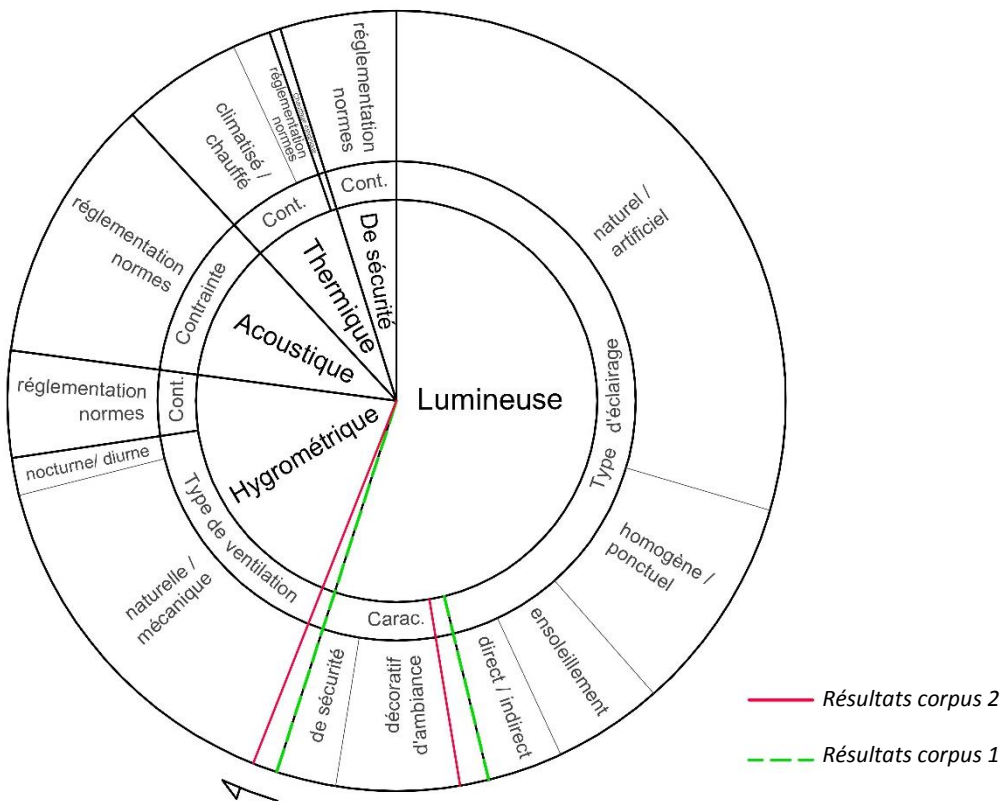


Figure 13 Superposition des diagrammes de répartition des exigences de confort.

3.5 Bilan

Nous nous sommes focalisés au niveau de ce chapitre sur l'identification des ESQ_L décrites en phase de programmation architecturale, en vue de discerner celles fréquemment utilisées et par conséquent, pertinentes à prendre en considération dans les pratiques BIM actuelles. Pour ce faire, un travail d'analyse de contenu est effectué sur un ensemble de documents de programmation architecturale. Ce travail s'est déroulé sur trois phases.

La première phase s'est penchée sur l'identification des mots utilisés pour désigner les exigences sur les espaces et ensuite sur la catégorisation de ces mots. Ce qui a permis de dresser des grilles de catégorisation pour les ESQ_L. Dans la deuxième phase, un travail d'identification des qualificatifs a permis de détecter les différents qualificatifs utilisés pour décrire chaque mot, avant de les regrouper selon le sens et la nature. **Cette phase du présent travail d'analyse nous a sensibilisés davantage à l'importance des ESQ_L dans les documents de programmation architecturale et à la nécessité de leur prise en compte dans les pratiques BIM courantes.** Dans la troisième phase, le calcul des pourcentages mesurant les fréquences d'apparition des qualificatifs a permis d'avoir une première vue d'ensemble dans une seule grille d'analyse. Sur la base de cette grille, les résultats ont été ensuite représentés sous forme de diagrammes qui répartissent par ordre d'importance les qualificatifs utilisés pour décrire chaque type d'exigence. Une dernière étape de cette phase a consisté à vérifier la stabilité des résultats obtenus par le biais du calcul des fréquences d'apparition des qualificatifs de notre grille d'analyse sur un deuxième corpus (corpus 2 = corpus 1 + 1 document).

Nous avons constaté à travers ce travail d'analyse que les **exigences d'accessibilité les plus décrites en phase de programmation architecturale concernent le type d'accès.** Tandis que, **les exigences de topologie concernent trois catégories d'exigences**, à savoir, **la disposition des espaces** les uns à côté des autres, **leurs relations** et **leur distribution.** Parmi lesquelles, les qualificatifs les plus fréquemment utilisés concernent les **contraintes de disposition, les types de relation et ensuite les types de distribution.** Quant aux **exigences de confort, elles concernent cinq catégories d'exigences.** Parmi lesquelles, **les exigences lumineuses sont les plus fréquemment décrites**, suivies des exigences hygrométriques, acoustiques, thermiques et enfin celles de sécurité. Dans ce dernier type d'exigences, **les qualificatifs les plus fréquemment utilisés concernent le type d'éclairage et le type de ventilation souhaités à l'intérieur des espaces.**

Bien qu'il s'agit au niveau de ce travail d'analyse d'une méthode d'analyse qualitative qui repose sur des documents textuels variés, l'utilisation du logiciel NVivo et l'automatisation de certaines tâches nous ont permis d'aboutir à des résultats précis et stables. Il est toutefois à noter que ces résultats peuvent être encore plus précis avec la sélection d'un corpus plus large, intégrant d'autres types de projets qui impliquent d'autres descriptions que nous n'avons pas rencontrées au cours de ce travail d'analyse (ex. une prison dont le programme architectural est fondé sur des exigences d'accessibilité et de distribution complexes). Un tel travail pourrait alimenter nos grilles de catégorisation des ESQ_L et enrichir, par conséquent, nos diagrammes de répartition.

Ce travail d'analyse nous a permis de réaliser que les documents programmation architecturale comportent un grand nombre de descripteurs subjectifs ou ambigus (ex. *Accès facile, sortie rapide, climatisation optimisée, ventilation soignée, etc.*) qui ne peuvent en aucun cas orienter le concepteur dans sa prise de décision. Bien que ces qualificatifs semblent inutiles en phase de conception, ils sont bels et bien présents dans la plupart des documents analysés. Éviter ces qualificatifs dans les documents de programmation architecturale permet de faciliter au concepteur la lecture du programme et l'identification des ESQ_L nécessaires à l'aboutissement de son travail de conception.

L'analyse de différents documents de programmation architecturale nous a sensibilisé à la richesse de ces documents en ESQ_L. Ces ESQ_L sont décrites pour guider le concepteur dans sa quête de réponse architecturale. Leur présence dans l'outil BIM permet ainsi d'assister le concepteur à produire des espaces plus conformes aux exigences demandées. La question que nous nous sommes posée à cette étape de la présente étude est « ces ESQ_L sont elles prises en comptes par les outils BIM actuels ? ». Pour pouvoir répondre à cette question, nous passons dans le chapitre suivant à l'analyse de la situation des ESQ_L dans les outils BIM actuels.

CHAPITRE 4

LES ESQ_L DANS LES OUTILS BIM ACTUELS

Basés sur l'intérêt de la prise en compte des ESQ_L dans les pratiques BIM courantes, souligné dans la première partie de ce travail de recherche (section 2.1), nous présentons dans ce chapitre un état de l'art sur la situation du concept d'espace architectural dans les pratiques BIM courantes et nous mettons sous la lumière les limites des outils BIM existants à prendre en compte et à gérer les informations concernant l'espace architectural, spécifiquement celles relatives à la phase de programmation.

Pour ce faire, divers outils BIM existants sont analysés de façon à déterminer leurs limites à favoriser une conception orientée vers l'espace architectural (Siala & al. 1, 2016) et spécifiquement vers le respect des ESQ_L identifiées dans le chapitre précédent. Le présent travail d'analyse a également pour objectif de mettre en évidence les tâches de conception / collaboration (sur les espaces) qui ne sont pas prises en compte dans les pratiques BIM courantes et qui représentent des pistes d'amélioration possibles à investiguer au niveau de cette étude.

4.1 Méthode d'analyse

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les limites des outils BIM actuels à représenter et à gérer les ESQ_L en phase de conception architecturale, mais aussi de comprendre leurs limites à favoriser une approche de conception orientée 'espace'. À travers des tests d'utilisation, notre méthode d'analyse consiste à évaluer la capacité de ces outils à permettre l'exécution des tâches de conception/ collaboration, définies au niveau du deuxième chapitre (tableau 1). Notre méthode d'analyse s'étale sur trois étapes, à savoir :

- la première étape de pré-analyse consiste à sélectionner des outils BIM à analyser, la préparation d'un modèle BIM à manipuler et l'identification des différentes tâches à tester par les outils sélectionnés,
- la deuxième étape concerne le travail d'analyse, au cours duquel le modèle préparé est manipulé par les différents outils BIM sélectionnés afin de détecter les limites de chaque outil à exécuter les tâches définies ; à représenter et à gérer la sémantique des espaces, à continuer à l'enrichir et à collaborer en prenant en compte ces informations,
- la troisième étape porte sur le traitement des données et l'interprétation des résultats obtenus. Les données sont d'abord traitées de façon à constituer une vision globale sur les résultats des outils analysés. Puis, l'interprétation des données permet de mettre en évidence les limites des outils BIM analysés à réaliser les tâches prédéfinies et de déduire ensuite les tâches qui ne sont pas possibles à exécuter et qui constituent, par conséquent, des champs d'investigations possibles dans le cadre de cette étude.

4.2 Pré-analyse

4.2.1 Outils BIM sélectionnés

Le travail d'observation est réalisé sur un ensemble de logiciels BIM, de plug-ins³⁵ et de groupwares³⁶. Concernant les logiciels BIM, nous nous intéressons spécialement aux

³⁵ Modules d'extension de certains outils, est un paquet qui complète un logiciel hôte pour lui apporter de nouvelles fonctionnalités.

³⁶ Collecticiels, ou encore logiciels de groupe permettant à un groupe de concepteurs de communiquer et de partager des documents et à distance pour favoriser le travail collaboratif.

logiciels de CAAO³⁷ les plus connus, à savoir Revit³⁸, ArchiCAD³⁹ et Allplan⁴⁰ dans leurs versions 2018. Parmi les Plug-ins disponibles, nous avons sélectionné ceux qui se concentrent sur le concept d'espace architectural et ses exigences, à savoir : dRofus et Xinaps. Enfin, pour les Groupwares, les plateformes collaboratives BIM360, Bim TRACK et Solibri Model Chacker et le logiciel Tekla Bimsight ont été sélectionnés. Nous exposons ci-dessous une brève présentation de l'ensemble des plug-ins et des groupewares sélectionnés.

a- DRofus

Présentation

dRofus est un outil de collaboration qui propose une assistance en matière de flux de travail et d'accès aux informations dédié aux exigences spatiales⁴¹. Il a été développé sur la demande de propriétaires souhaitant prendre possession de leurs données sur le bâtiment dans une plateforme centralisée et de s'assurer que leurs exigences ont bien été respectées. Sa première version a été créée par la société norvégienne Nosyko en 1995, avant la création de la compagnie dRofus en 2011 qui a récemment rejoint le groupe Nemetschek⁴² en 2017. Ce plug-in est actuellement à sa version 2.2.25, publiée en juillet 2019. Contrairement à plusieurs outils BIM qui proposent une conception pilotée par le modèle BIM, cet outil propose une conception pilotée par les données. Il repose sur les données pour définir les exigences, les vérifier et les valider, avant d'évoluer dans la modélisation. Il représente une plateforme de gestion des données non graphiques sur le projet, une base de données centralisée et accessible par les différents acteurs du domaine du bâtiment. Ces données sont modifiées principalement dans dRofus, avant d'être échangées avec les logiciels de CAAO/BIM (principalement avec Revit et ArchiCAD).

Fonctionnement

Ce logiciel permet d'abord de définir des gabarits de types de pièces et d'y associer des documents et des équipements. Étant spécialisé à son début au secteur hospitalier, il se focalise sur les exigences d'équipement (appareils médicaux, mobilier spécialisé, etc.) et

³⁷ On distingue entre Computer Aided Architectural Design (CAAD) et Computer Aided Design (CAO). Les logiciels de CAAO permettent de créer des modèles d'architecture avec les divers documents nécessaires à leur construction.

³⁸ <https://www.autodesk.com>

³⁹ <https://www.graphisoft.com/archicad>

⁴⁰ <https://www.allplan.com/en>

⁴¹ <https://www.drofus.no/en/product.html>

⁴² <https://www.nemetschek.com>

permet de catégoriser les équipements et d'en constituer une bibliothèque personnalisée réutilisable. Le plug-in permet ensuite de placer les pièces et leurs équipements dans l'interface du logiciel CAAO directement à partir de la liste des gabarits de pièces de dRofus (figure 14). Pour faciliter la vérification du respect des surfaces et des équipements demandés, il génère un tableau des surfaces et des équipements des pièces conçues par simple synchronisation avec le modèle BIM.

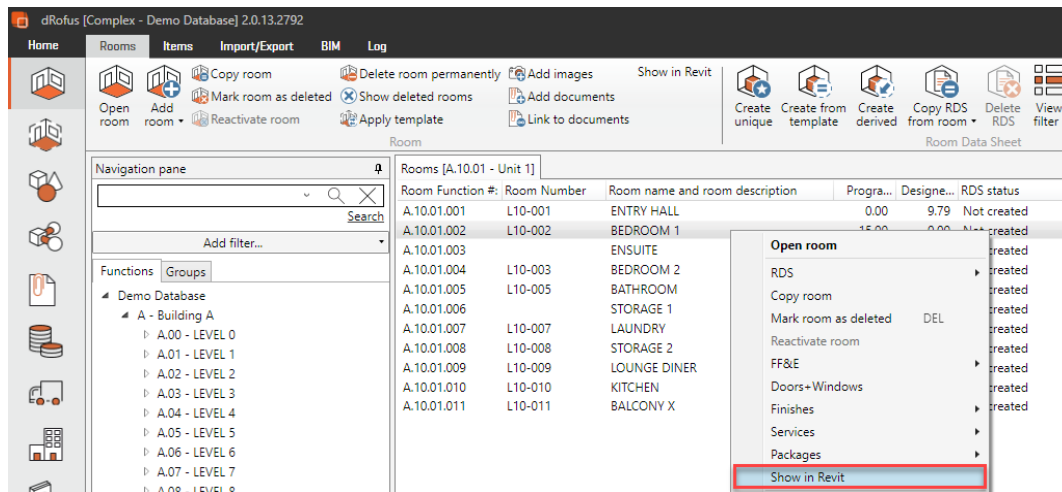


Figure 14 Interface du plug-in dRofus pour Revit, liste des gabarits des pièces et visualisation sur Revit (<https://wiki.drofus.com>)

b- Xinaps

Présentation

Xinaps est un outil développé pour Revit, dédié à la vérification du respect des normes d'accessibilité et de sécurité incendie. Il s'agit d'une solution plus ou moins récente, puisque sa première version a été mise au point en 2015 par une équipe de professionnels hollandais. L'outil ne cesse de se développer depuis et est actuellement sa version 1.5.4, publiée en mars 2018. Xinaps est destiné aux architectes et aux BIM managers. Il propose dans sa plateforme cloud Verifi3D des analyses automatiques qui permettent de valider les données du bâtiment sur la sécurité des occupants⁴³. Cette validation passe par un processus de vérification et de visualisation. La démarche de vérification est réalisée sur la base des normes et des réglementations locales. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de synthèses et mis en évidence graphiquement dans des vues en plan ou en 3D interactive.

⁴³ <https://xinaps.com/verifi3d/>

Fonctionnement

- En plus des normes locales, l'évaluateur d'accessibilité permet au concepteur d'ajouter des règles personnalisées (ex. la distance entre deux espaces). Son exécution calcule les distances maximales de distribution des pièces et donne ainsi une synthèse, avec une visualisation selon une logique spatiale, sur les surfaces accessibles et inaccessibles (figure 15).
- L'évaluateur de la sécurité incendie permet de définir le type de compartiment (coupe-feu, coupe-fumée, coupe flamme), de déterminer la durée de protection des portes d'accès et de vérifier le nombre des issues de secours suivant le nombre d'occupants prévu. Il permet également de calculer la durée du parcours de secours avec une mise en évidence graphique des résultats (figure 16).

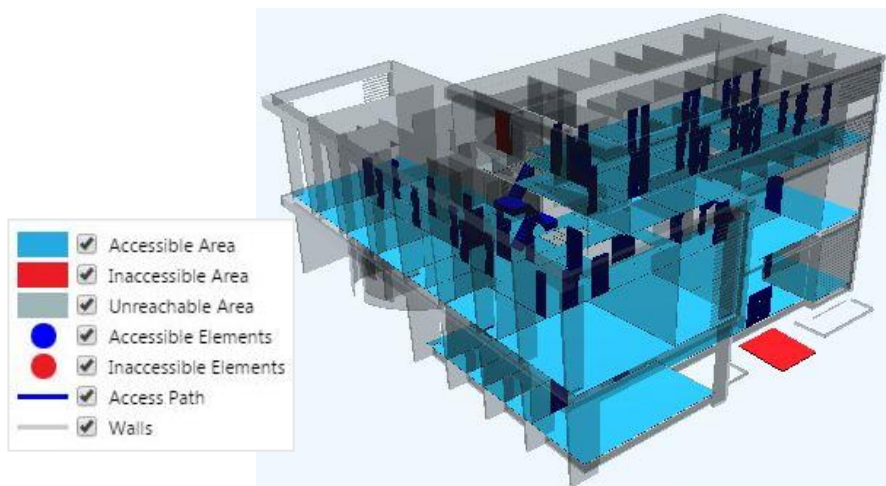


Figure 15 Capture d'écran de l'évaluateur d'accessibilité de Xinaps.

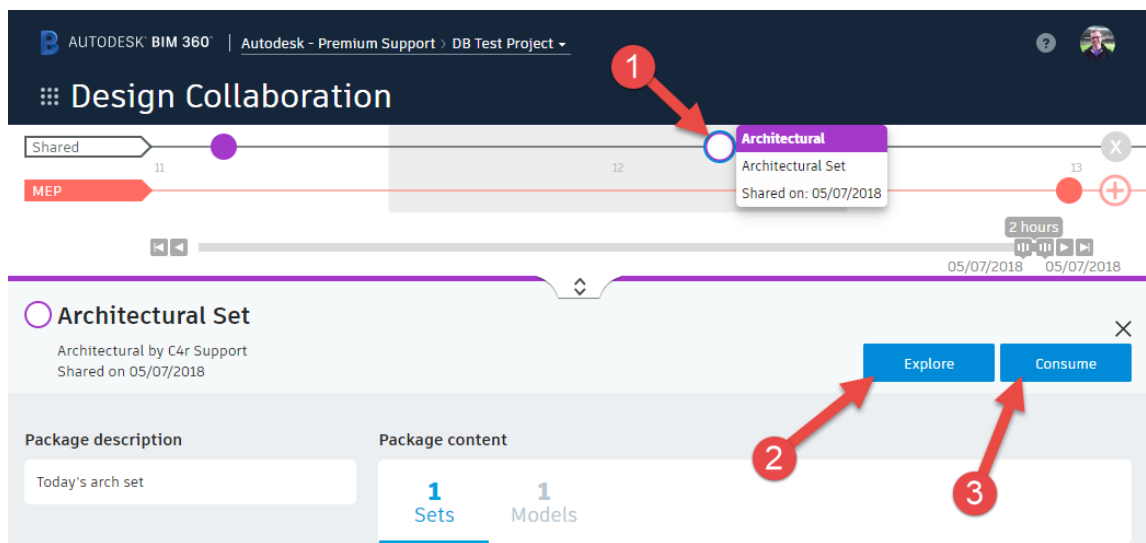


Figure 16 Capture d'écran de la fenêtre volante de l'évaluateur de sécurité incendie de Xinaps, résultats du calcul du parcours de secours.

c- BIM 360

Présentation

BIM 360 est une plateforme de collaboration Cloud développée par Autodesk en 2017 compatible avec ses différents outils BIM, notamment avec Revit. Elle est en constante évolution depuis et propose des mises à jour très rapprochées. Parmi les différentes applications de BIM 360 (Docs, Built, Design, Glue, etc.), l'application BIM 360 Design traite de la collaboration en phase de conception. Elle permet aux concepteurs de travailler en temps réel sur un modèle numérique central à travers un système de validation et de droits d'accès. Cette application assure la coordination des livrables des différents acteurs et permet de suivre l'évolution de la conception à travers le suivi des mises à jour des différents acteurs dans un environnement dédié, où l'état d'avancement de chaque acteur est représenté sous forme de ligne, sur laquelle il peut partager sa contribution sous forme de package (affiché sous forme de point) consultable et consommable par le reste des acteurs intervenants (figure 17).



Légende : 1. sélectionner un package 2. explorer 3. consommer

Figure 17 Capture d'écran BIM 360 Design Collaboration, état des mises à jour, consultation et consommation des packages (<https://info.bim360.autodesk.com/bim-360-design>)

Fonctionnement ?

À travers l'application BIM 360 Design, les acteurs peuvent partager des packages (versions de modèle) et en consommer d'autres jusqu'à la validation du travail de chaque acteur. La collaboration dans cette application est assurée par le suivi d'un certain nombre d'étapes (figure 18). Après avoir conçu son modèle avec Revit, le concepteur doit d'abord

l'enregistrer dans l'espace de partage en cloud. Ensuite, pour le partager avec les autres acteurs, il doit le publier dans l'espace de collaboration en tant que package accessible. Le package permet au reste des acteurs de visualiser les données du modèle avant de décider de les consommer (les utiliser pour approuver ou pour proposer des révisions). L'acteur qui décide intervenir sur un package doit ouvrir le modèle dans l'espace de partage du cloud, apporte les modifications nécessaires et enregistre de nouveau le modèle vérifié et/ou accepté dans le même espace. Les conflits de versions détectés par la vérification automatique de l'application (ex. croisement entre élément de structure et élément de plomberie, échappée d'un escalier, etc.) peuvent être partagés et discutés avec le reste des acteurs dans l'espace de gestion des documents, tout comme les annotations partagées.

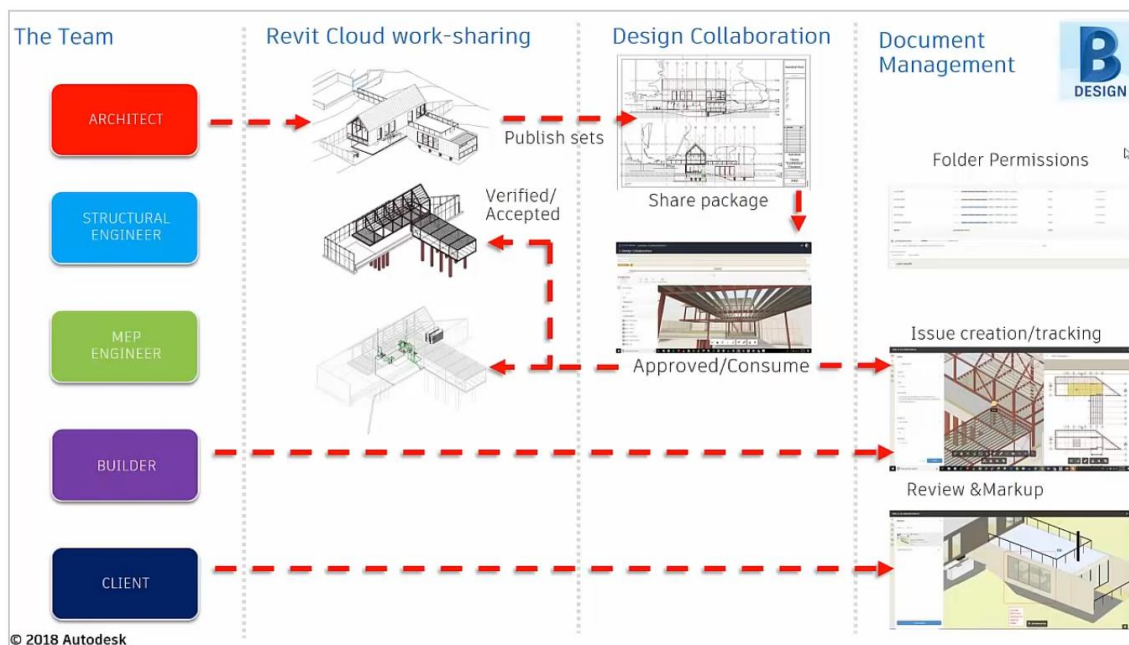


Figure 18 Les différentes étapes de collaboration de BIM 360 pour Revit (<https://info.bim360.autodesk.com/bim-360-design>)

d- *BimTRACK*

Présentation

BIM TRACK est une plateforme Web dédiée à la coordination. C'est une solution de gestion de flux de travail OpenBIM⁴⁴ basée sur un visualiseur Web. Elle a été développée en 2016 par une équipe canadienne spécialisée dans la démarche BIM pour la coordination des

⁴⁴ L'Open BIM est un programme de coopération universel, reposant sur des standards et des processus ouverts, destinés au domaine de la conception (<https://openbim.fr>).

travaux d'extension d'un aéroport au Québec et est actuellement à sa version 1.35.0 publiée en mars 2019. Cette plateforme centralise l'information sur la coordination tout au long du processus de conception-construction et assure la détection des conflits des versions.

Fonctionnement

La plateforme prend en charge les formats standards, principalement le format BCF (BIM Collaboration Format) enregistré à partir de logiciels de CAO/BIM, comme Revit, ArchiCAD et Tekla Structure⁴⁵. Elle assure la détection des conflits à travers un système de comparaison basé sur les coordonnées des objets du bâtiment. Les conflits détectés peuvent être commentés et échangés entre les acteurs, avec une visualisation interactive 3D (figure 19). Bim TRACK peut être utilisé sur sa plateforme Web ou bien directement sur le logiciel CAO/BIM utilisé à travers un plug-in. Sur la base de ce système de détection des conflits, la plateforme facilite la rédaction des rapports de coordination en générant des rapports personnalisés pouvant être rectifiés et réutilisés comme modèles de rapports.

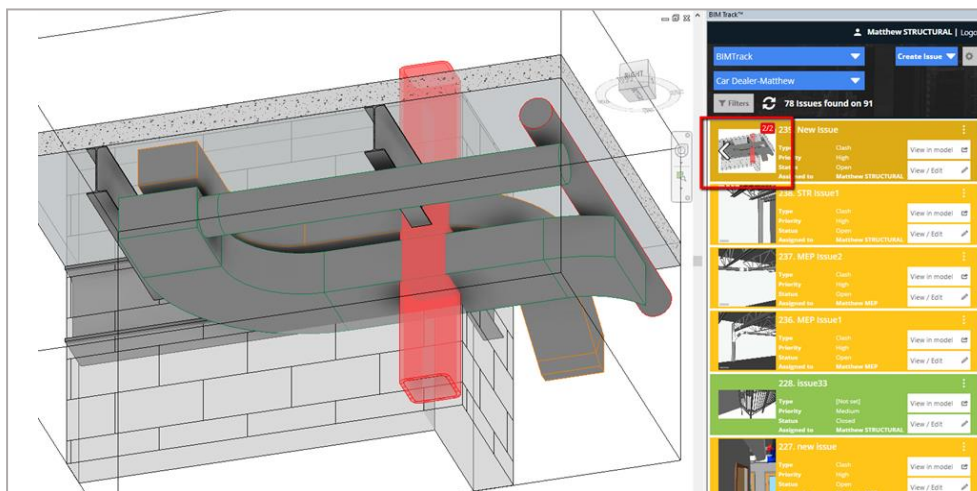


Figure 19 Détection des conflits entre les versions (<https://bimtrack.co/features>).

e- Tekla BIMsight

Présentation

Tekla BIMsight est un logiciel⁴⁶ de coordination commercialisé en 2011 par la société finlandaise de développement de logiciels destinés à la construction et spécifiquement à l'ingénierie structure Tekla⁴⁷. Il est compatible avec la plupart des logiciels BIM actuels et

⁴⁵ <https://www.tekla.com/fr/produits/tekla-structures>

⁴⁶ À installer sur machine.

⁴⁷ <https://www.tekla.com>

permet de combiner différents modèles numériques (architecture, structure, MEP, etc.) en un modèle central, de détecter les conflits des versions et de faciliter la communication entre les différents acteurs de la conception.

Fonctionnement

Le logiciel récupère les modèles sous le format IFC et les superpose afin d'identifier les conflits d'une manière manuelle ou automatique. La vérification manuelle propose différentes formes de visualisation ; la visualisation des différents plans de coupe permet de focaliser son attention sur une partie du modèle pour vérifier les conflits (avec utilisation de l'outil de cotation des distances), d'enregistrer des vues interactives et de les annoter pour signaler le problème et le partager avec d'autres acteurs (figure 20). Une visualisation par groupe d'objets est également possible permettant d'isoler certains objets (murs, poteaux, etc.) et d'en cacher d'autres pour vérifier la relation entre les objets. L'annotation dans Tekla BIMsight peut être associée à l'objet même ou à la totalité de la vue. Les acteurs peuvent ainsi revoir la vue d'une annotation pour rectifier ou contrôler l'avancement de l'élément annoté.

La vérification dans Tekla BIMsight peut aussi s'effectuer avec un simple lancement de la détection automatique des conflits, après avoir sélectionné les deux maquettes à vérifier (ex. Structure et MEP). L'exécution de cette vérification engendre une statistique des conflits avec des notifications sur la vue en 3D (figure 21). Il s'agit des conflits d'intersection entre les composantes de structure et de MEP⁴⁸. Le concepteur peut ainsi revoir sa conception selon les erreurs notifiées et enregistrer des vues ou des captures d'écran pour communiquer les erreurs mentionnées aux concepteurs responsables.

⁴⁸ Mécanique, électricité, plomberie

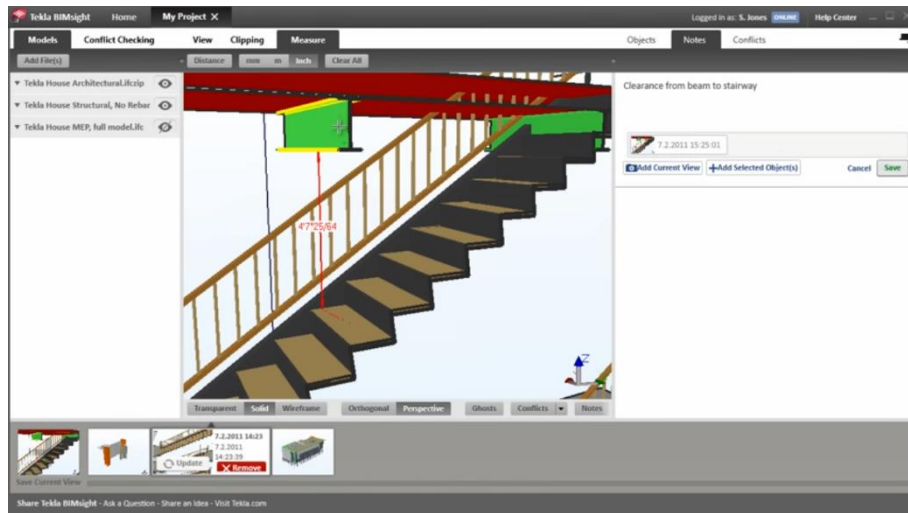


Figure 20 Capture d'écran Tekla BIMsight, visualisation du modèle BIM d'un immeuble en R+4 selon deux plans de coupe verticaux pour isoler la cage d'escalier et vérifier l'échappée.

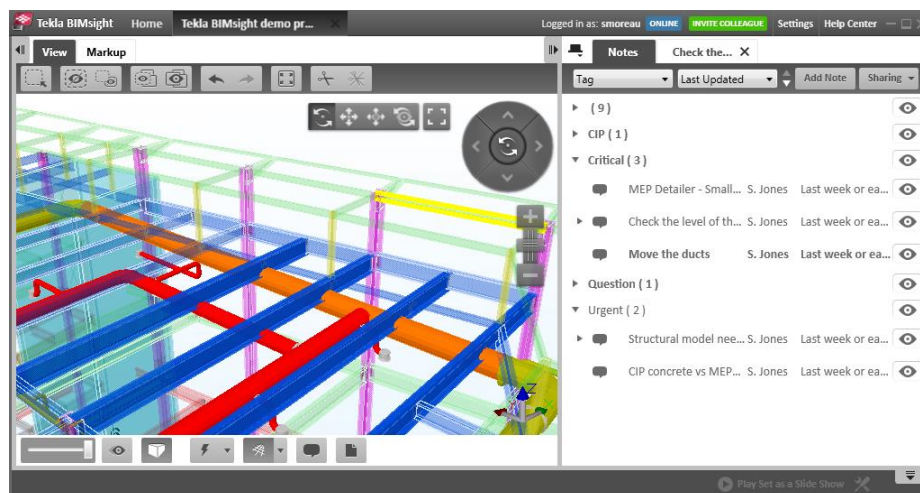


Figure 21 Capture d'écran Tekla BIMsight, détection automatique des conflits entre le modèle de structure et le modèle MEP du même projet

f- Solibri Model Checker (SMC)

Présentation

Solibri Model Checker⁴⁹ est une solution logicielle de contrôle qualité BIM développée en 2013 par la société de développement logiciel spécialisée en ingénierie de structure SCIA⁵⁰. C'est une application Web qui analyse les modèles de bâtiments pour en assurer le contrôle de la conformité aux normes de construction et aux pratiques des concepteurs. Elle

⁴⁹ <https://www.solibri.com/>

⁵⁰ <https://www.scia.net/en/company/>

permet également de détecter les conflits des versions. L'application est achetée en 2015 par le groupe Nemetschek et est actuellement à sa version v9.9.6, publiée en juin 2019.

Fonctionnement

Parmi les formats standards existants, cette application travaille uniquement avec le format IFC et spécialement sur la base des fichiers IFC enregistrés à partir de logiciels de CAO générant des fichiers IFC plus ou moins complets à l'image de Revit, ArchiCAD et Tekla. Pour chaque modèle téléchargé (architecture, structure, MEP, électricité, etc.), elle génère un modèle Solibri optimisant et réduisant le volume de ces données pour ensuite les rassembler dans un même environnement et générer un modèle central.

Pour faciliter le contrôle manuel du modèle, l'application propose une visualisation par plans de coupes formant des box pour spéculer un détail précis. Elle propose également d'isoler des compartiments (ex. étage ou espace), d'afficher/cacher des objets (ex. murs, espaces, portes.), ou encore de faire une visite libre à l'intérieur du modèle. Son système de navigation facilite à l'utilisateur la visite et la vérification de l'ensemble du modèle (ex. mise en transparence des points d'accès au passage, arrêt en présence d'obstacle, etc.).

En plus du contrôle manuel, cette application assure un contrôle automatique des modèles, basé sur des règles de vérification de données quantitatives, regroupées en plusieurs catégories, à savoir :

- des règles de vérification de la qualité BIM (architecture, structure, MEP, électricité, etc.). Ces règles permettent de vérifier la fiabilité des données échangées. Par exemple, la vérification BIM architecture permet de signaler les ouvertures non associées à un mur hôte (figure 22), les objets non attachés (ex. poteaux/dalle, murs/dalle, etc.) (figure 23), les objets de structure qui ne se trouvent pas à l'intérieur des objets d'architecture et derrière une couche d'enduit, etc.,
- des règles de vérification des normes du bâtiment comme les normes d'accessibilité (ex. vérification de la distance entre les portes intérieures et celles de sortie).
- des règles d'analyse énergétique,
- des règles de détections des conflits des versions. Ces règles permettent d'identifier les objets ajoutés, supprimés ou modifiés dans la nouvelle version. Les objets détectés peuvent être ensuite affichés et mis en évidence séparément dans la vue en 3D. Les objets ayant subi des changements sont visualisés de façon à montrer le changement (ex. le mur qui a été allongé s'affiche en deux couleurs mentionnant la longueur initiale et celle ajoutées dans la nouvelle version),

- des règles de vérification du confort à l'intérieur des espaces. Ces règles assurent la vérification des équipements prévus (ex. équipements de climatisation et de chauffage), par rapport à la surface des espaces conçus.

Dans SMC, il est également possible de personnaliser les paramètres de certaines règles et d'en créer des nouvelles selon les besoins du concepteur. Il est toutefois à noter que les procédures de vérification de cet outil se basent sur des données purement quantitatives. Le lancement d'un processus de vérification génère un rapport des problèmes détectés. Le navigateur automatique affiche une visualisation 3D du problème sélectionné et permet de mettre en évidence les objets en question en masquant le reste. Pour assurer une communication relative à ces problèmes, l'application permet d'envoyer des notifications concernant les problèmes de coordination aux concepteurs concernés. La communication est assurée à l'aide du format BCF.

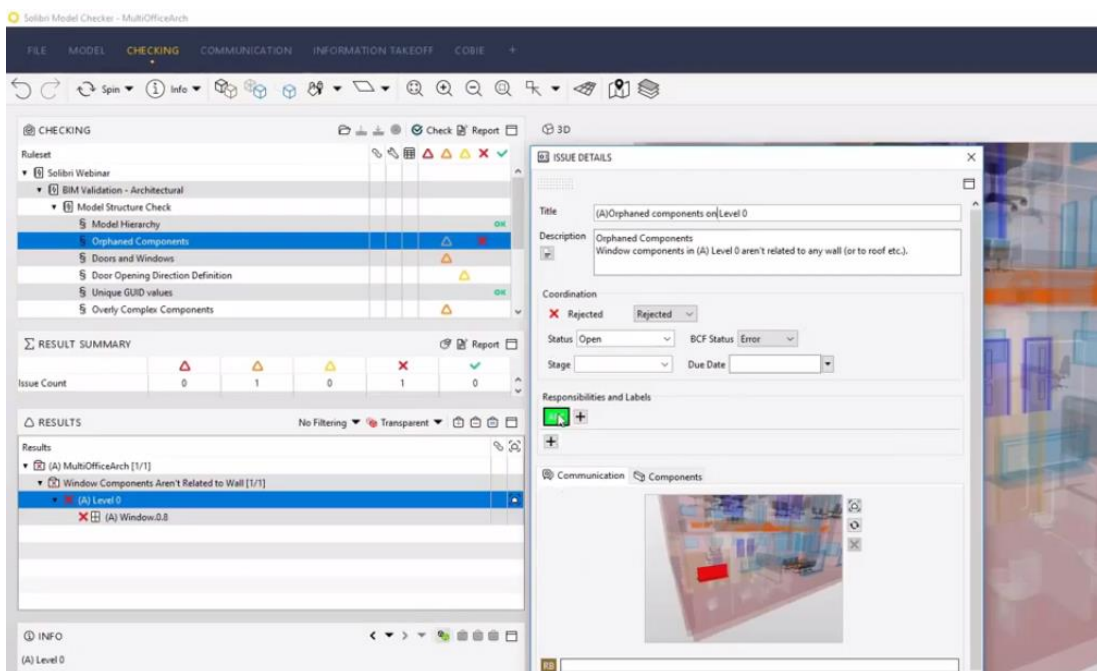


Figure 22 Capture d'écran SMC, vérification automatique BIM architecture (fenêtre qui n'est pas reliée à son mur hôte) et création d'une notification pour l'architecte.

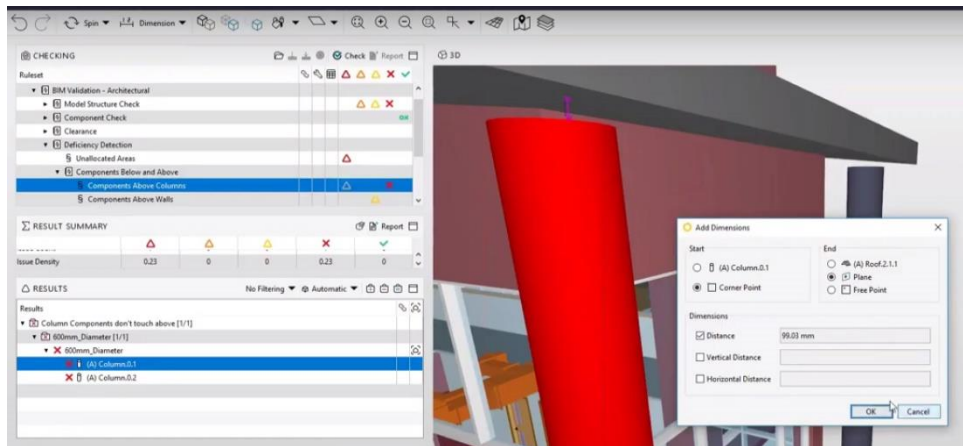


Figure 23 Capture d'écran SMC, vérification automatique BIM architecture (attachement des éléments et vérification de la distance)

4.2.2 Préparation du modèle à manipuler et définition des tâches à exécuter

a- Modèle de base

Pour tester les différents outils BIM sélectionnés, un simple modèle numérique est conçu à travers un outil CAAO/BIM (figure 24) et enregistré sous le format IFC, pour être manipulé par chaque outil. Ce modèle est conçu sur la base d'un ensemble d'ESQ_L, entre autres, des exigences d'accessibilité, de topologie et de confort. Il s'agit de découper un rectangle de 8m x 12m en six espaces selon les exigences décrites à la figure 24.

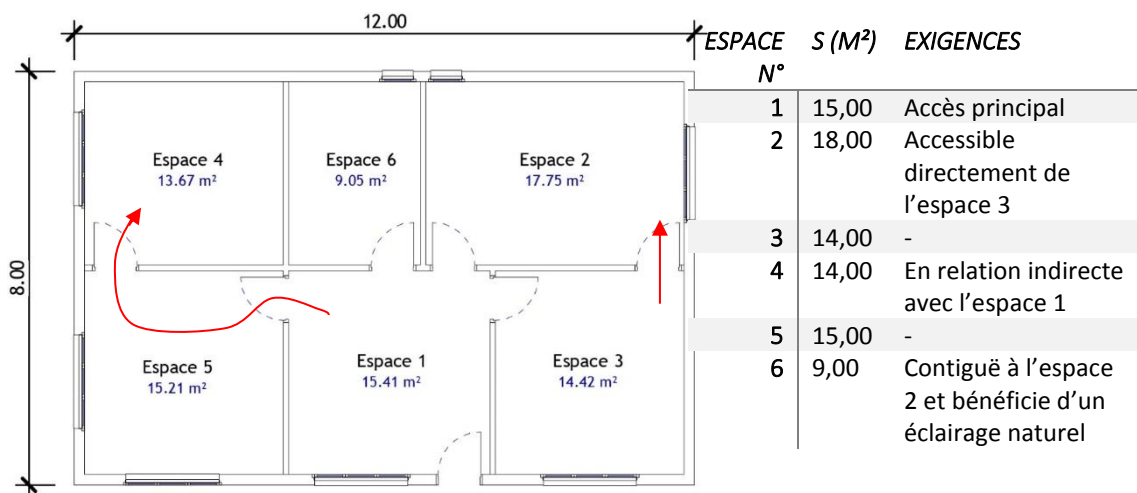


Figure 24 Modèle de base et exigences demandées

b- Tâches à exécuter

Il s'agit de l'exécution des tâches de conception et de collaboration discutées dans le deuxième chapitre (section 2.1) qui mettent en évidence le potentiel des ESQ_L dans la démarche BIM, comme aide à la co-production, à la coordination et à la communication entre les différents acteurs du domaine du bâtiment (tableau 1).

Pour la co-production, les tâches à exécuter concernent d'abord l'ajout, la modification et la suppression d'un espace. Elles concernent ensuite la visualisation d'un espace et l'enrichissement de sa sémantique par des exigences d'ordre quantitatif, mais aussi d'ordre qualitatif. Pour la coordination, les tâches portent d'abord sur la vérification des données concernant les espaces, à savoir la vérification des exigences quantitatives et qualitatives, spécialement les ESQ_L identifiées au niveau du troisième chapitre. Mais aussi, la vérification des conflits, des versions concernant les espaces. Elles portent ensuite sur la navigation dans le modèle BIM selon une logique spatiale (visite libre, regroupement des ouvrages par espace, regroupement des notifications par espace, etc.). Pour la communication, les tâches consistent essentiellement à pouvoir recevoir et émettre des notifications mentionnant la conformité des données préalablement vérifiées.

4.3 Analyse

Au niveau de cette phase, nous sommes passés à l'analyse des différents outils BIM sélectionnés. Le fichier IFC préparé a été ouvert par chaque outil BIM, où nous avons essayé d'exécuter l'ensemble des tâches définies pour déterminer les limites de chaque outil à collaborer en tenant compte de l'information sur l'espace architectural. Les observations sont illustrées dans une grille d'analyse au fur et à mesure de la manipulation de chaque outil. Cette grille (figure 25) présente verticalement la liste des outils testés et dénombre, horizontalement, les différentes tâches définies et leurs données respectives classées selon la nature du travail collaboratif en question (Co-production, coordination ou communication).

		Tâches												
		Co-production				Vérifier				Communication				
		Ajouter / mod. / supp.	Visualiser	Enrichir l'espace		Exigences			Conflits / changements	Naviguer	Recevoir / émettre des notifications			
		Espace	Espace	Exigences		Exigences		Espaces	Espaces	Conformité aux exigences		Conflits / changements		
Données			ESQ _N	ESQ _L	ESQ _N	ESQ _L		Espaces		ESQ _N	Qualitatives		Espaces	
						ESQ _L réglementaires ou de validation BIM	ESQ _L identifiées				ESQ _L réglementaires ou de validation BIM	ESQ _L identifiées		
N° de tâche		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Outils BIM	Logiciels CAAO	Revit	x	x	x	x*								
		ArchiCAD	x	x	x	x*								
		Allplan	x	x	x	x*								
	Plug-in	dRofus	x	x	x	x	x	x			x	x	x	
		Xinaps		x			x	x			x	x	x	
	Groupwares	BIM 360		x										
		Bim Track		x										
		Tekla Bimsight		x										
		SMC		x			x	x				x	x	

* Ajoutées sous forme de nouveaux paramètres dans la version 2017



Tâches non prises en comptes par tous les outils BIM analysés

Figure 25 Grille d'analyse des outils BIM sélectionnés

4.4 Traitement des données et interprétation des résultats

4.4.1 Traitement des données

Les données de la grille d'analyse sont ensuite représentées sous forme de diagrammes circulaires permettant de souligner les limites de chaque outil analysé, mais également de mettre en évidence les tâches qui ne sont pas réalisables par l'ensemble des outils (figure 26). Ces diagrammes circulaires sont divisés en autant de secteurs que de tâches testées. Les secteurs sont coloriés selon l'état des tâches (tâches exécutables : en vert / tâches non exécutables : en gris), constituant ainsi une première vue d'ensemble des résultats de ce travail d'analyse. Pour minimiser le nombre des diagrammes générés, les outils appartenant au même type d'outils BIM (logiciel, plug-in ou groupware) et ayant les mêmes résultats sont regroupés dans un seul diagramme. Cinq diagrammes d'analyse en résultent, à savoir : un diagramme pour les trois logiciels CAAO/BIM analysés, deux diagrammes pour les plug-ins (un pour dRofus et un pour Xinaps) et enfin deux diagrammes pour les groupwares, un pour les outils de coordination/collaboration (BIM 360, BIM Track et Tekla Bimsight) et un autre pour l'outil de validation Solibri Model Chacker (SMC).

4.4.2 Interprétation des résultats

Cette étape d'interprétation est cruciale, elle permet de valider les constats mis en avant dans le premier chapitre décrivant les limites des outils BIM actuels à supporter l'information sur l'espace architectural et ses exigences d'ordre qualitatif. Elle permet en outre d'identifier les outils BIM les plus développés dans la manipulation des espaces architecturaux sur lesquels nous pouvons nous baser pour proposer une éventuelle amélioration qui permet une meilleure prise en compte des ESQJ dans les pratiques collaboratives courantes.

Les diagrammes des différents outils et groupements d'outils montrent des résultats hétérogènes. La variation de ces résultats est expliquée par le rôle de chaque type d'outil. Certains outils sont spécialisés dans les tâches de conception (logiciels CAAO/BIM), tandis que d'autres sont spécialisés dans les tâches de vérification et de validation (plug-ins et groupwares).

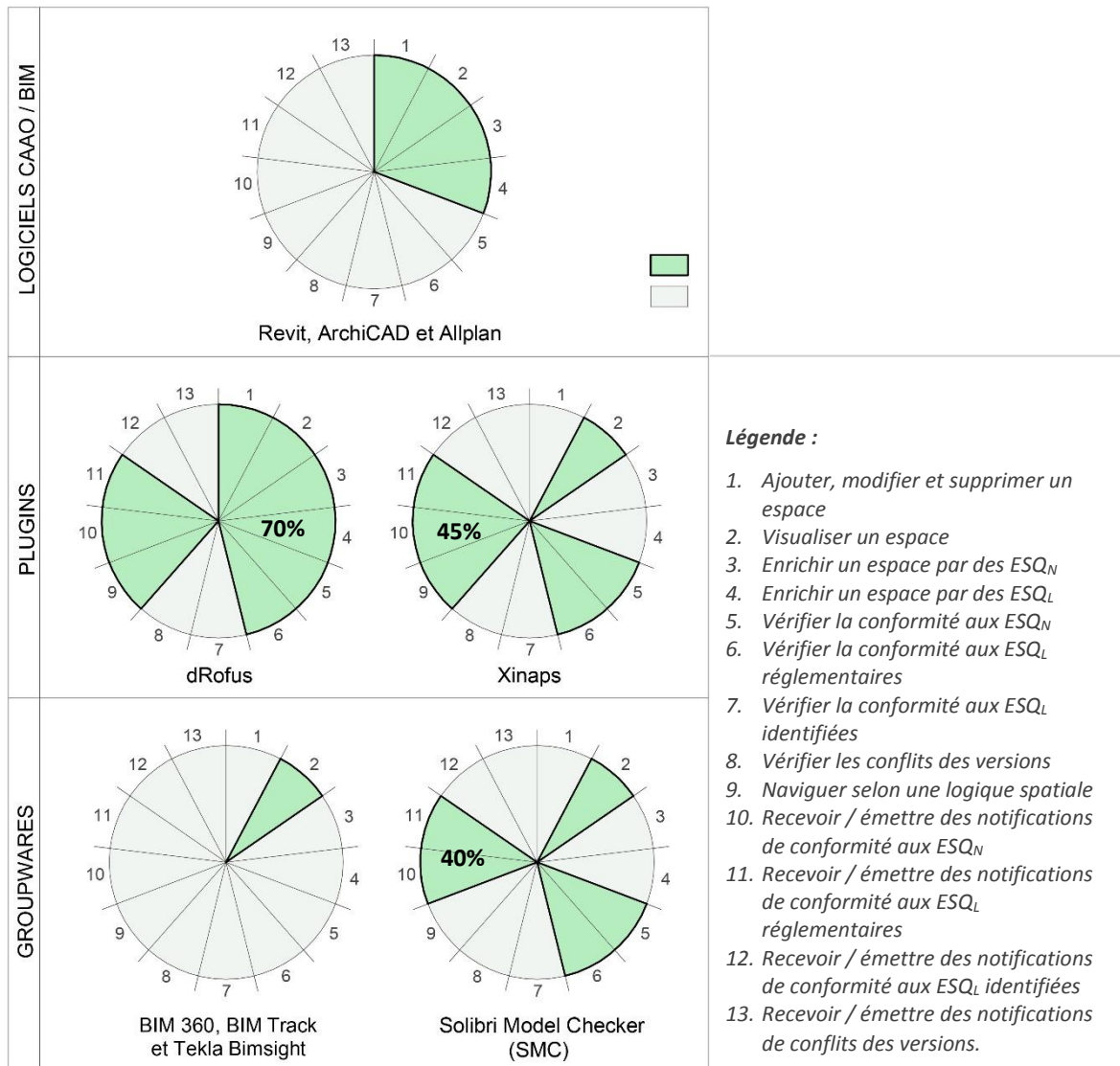


Figure 26 Diagrammes d'analyse des outils BIM sélectionnés

L'observation des différents diagrammes montre que le plug-in **dRofus** représente l'outil BIM le plus développé en ce qui concerne le concept d'espace architectural et ses exigences. Il a permis d'exécuter le plus grand nombre de tâches, avec environ 70% des tâches testées. Cela s'explique par l'orientation fonctionnelle de cet outil, puisqu'il est dédié à la vérification des exigences spatiales qualitatives (spécialement celles sur les équipements). Il permet d'enrichir la sémantique des espaces par les informations concernant les exigences d'équipement pour pouvoir ensuite les vérifier. La spécificité de cet outil est qu'il permet d'exécuter les tâches de conception (ajouter, modifier et supprimer des espaces) en préparant d'abord des gabarits d'espaces enrichis par des exigences sur les équipements, avant de passer à la conception en les ajoutant dans l'interface de l'outil BIM. **Les 30% des tâches non réalisées dans dRofus sont celles qui ne sont pas exécutables avec tous les outils BIM**

analysés (tâches 7,8,12 et 13). **Il s'agit des tâches de vérification des ESQ_L identifiées et des conflits entre les versions, ainsi que des tâches de communication des résultats des vérifications accomplies.**

En deuxième position se place le plug-in Xinaps avec 45% des tâches exécutables. Cet outil est dédié également à la vérification des ESQ_L réglementaires sur la sécurité des personnes), mais il ne permet pas d'exécuter les tâches de conception. Il s'agit d'un outil de vérification et de validation utilisé généralement, au cours ou en phase aval du processus de conception, par le coordinateur du projet ou par le BIM manager. Parmi les groupwares, SMC représente le groupware le plus développé pour la prise en compte de l'espace architectural. Il permet d'exécuter environ 40% des tâches définies et représente un outil ouvert à la création de plusieurs possibilités de vérifications selon le besoin du concepteur. Néanmoins, plus orienté vers les ouvrages du bâtiment et vers les données quantitatives, cet outil ne permet pas de naviguer dans le modèle en suivant une logique spatiale.

Le reste des groupwares (BIM 360, Bim Track et Tekla Bimsight) sont orientés uniquement sur la coordination et permettent essentiellement la détection des conflits des versions spécifiquement en ce qui concerne les ouvrages de structure et de plomberie. Ces groupwares ne prennent pas en considération l'espace architectural comme un objet du bâtiment au même pied d'égalité que les ouvrages (ex. murs, poteaux, planchers). Parmi les tâches testées, seules celles concernant la visualisation sont intégrées.

Quant aux **logiciels CAAO/ BIM** analysés, ils permettent principalement d'exécuter les tâches de conception sur les espaces. Bienqu'ils détectent les conflits entre les versions et les changements des mises à jour concernant les ouvrages, ils **ne prennent pas en considération les conflits concernant les espaces**. Ces outils subissent depuis quelques années des évolutions constantes en ce qui concerne le concept d'espace architectural et **permettent, depuis leurs versions de 2017 d'ajouter des exigences aux espaces sous forme de nouveaux paramètres⁵¹ ou encore sous forme de paramètres partagés⁵²**. Les propositions de développement les plus orientées vers l'espace architectural sont généralement présentées sous forme de plug-ins à ces outils, comme dRofus et Xinaps.

⁵¹ Paramètres spécifiques au modèle en cours.

⁵² Paramètres qui peuvent être utilisés dans d'autres modèles.

4.5 Bilan

Ce chapitre s'est intéressé à la prise en compte du concept d'espace architectural dans les usages BIM courants. Il s'agit de discerner les principales limites des outils BIM actuels à prendre en compte et à gérer l'information sur l'espace architectural et l'ensemble de ces exigences, spécialement les ESQ_L identifiées dans le chapitre précédent. Pour cela, nous avons procédé à l'analyse des outils BIM actuels les plus couramment utilisés, en intégrant aussi ceux qui sont spécialisés dans la définition des espaces et le respect des exigences spatiales. La sélection des outils BIM à analyser prend en compte les différents types représentatifs d'outils BIM, à savoir, les logiciels CAAO/BIM, les plug-ins dédiés à certains logiciels, ainsi que les Groupwares de collaboration.

Notre méthode d'analyse consiste en la manipulation d'un modèle en format IFC (.ifc) préparé sur la base d'un ensemble d'exigences spatiales qualitatives par les différents outils BIM sélectionnés, de façon à déterminer les tâches d'aide à la collaboration qui sont effectivement exécutables à travers chaque outil. Les résultats de cette étape ont été illustrés dans une grille qui a servi ensuite comme base pour le travail de traitement des données et d'interprétation des résultats. Au niveau de cette étape, les données de la grille d'analyse ont d'abord été représentées sous forme de diagrammes circulaires permettant de constituer une vue d'ensemble des résultats. L'interprétation de ces diagrammes a permis par la suite de déterminer les limites de chaque outil BIM à prendre en compte l'espace architectural et les exigences préalablement enrichies, à continuer à les enrichir et à collaborer tenant compte de ces informations.

Nous avons constaté à travers ce travail d'analyse que **les outils BIM actuels ne reconnaissent pas l'information sur l'accessibilité des espaces, leur topologie et leur confort et qu'ils ne permettent de vérifier ni les ESQ_L ni les conflits des versions concernant les espaces. La communication des résultats de ces vérifications n'est pas assurée, par conséquent.** Il a également été observé **que ces outils concentrent uniquement sur les ouvrages du bâtiment**, spécialement les ouvrages d'architecture et de structure et sur les équipements des lots spéciaux (ex. équipement de plomberie ou d'électricité). Ils permettent de lancer des processus de vérification basés sur la position et les propriétés géométriques des éléments pour identifier les conflits des versions.

Après avoir déterminé les limites des outils BIM actuels à prendre en compte les informations concernant les espaces, spécialement celles concernant les ESQ_L et avoir appréhendé, par conséquent, la situation de ces exigences dans les pratiques BIM courantes, nous passons dans le chapitre suivant à la détermination de la situation des ESQ_L dans les modèles de données existants ayant traité du concept d'espace architectural.

CHAPITRE 5 :

LES EXIGENCES SPATIALES QUALITATIVES DANS LES MODELES D'ESPACE EXISTANTS

Nous nous intéressons au niveau de ce chapitre à la situation de la représentation des ESQ_L dans les modèles de données existants qui traitent du concept d'espace architectural dans le contexte de la construction. Pour ce faire, différents modèles d'espace sont analysés afin de déterminer leurs capacités à prendre en compte et à structurer l'information sur l'espace architectural, spécialement l'information portant sur les exigences du programme et plus spécifiquement celles qualitatives d'accessibilité, de topologie et de confort (Siala & al. 1, 2016) (Siala & al. 2., 2016). Ce travail d'analyse permet de déterminer les limites des différents modèles existants à supporter et à structurer l'information sur les ESQ_L pour mettre en avant les besoins en termes de représentation conceptuelle et ainsi construire notre proposition d'une nouvelle représentation du concept d'espace architectural dans le contexte de la construction.

5.1 Méthode d'analyse

Pour identifier comment le concept d'espace architectural et ses exigences sont représentés dans les modèles de données orientés bâtiment, plusieurs modèles décrivant les espaces ont été analysés. Notre travail porte sur les modèles d'espace proposés durant ces trente dernières années et a comme objectif de comprendre l'évolution et les différentes orientations prises par le concept d'espace d'un modèle à un autre pour pouvoir proposer une représentation qui prend en compte les ESQ_L identifiées dans notre étude. Pour cela, nous procédons d'abord à une présentation des différents modèles sélectionnés, de leur cadre d'utilisation et de leurs principales spécifications autour du concept d'espace. Les observations sont illustrées au fur et à mesure de l'exploration de chaque modèle pour pouvoir passer à la deuxième étape de l'analyse où l'on porte un regard critique sur leur capacité à prendre en compte et à structurer l'information sur les ESQ_L. Quatre modèles de données ont été analysés : ceux proposés respectivement par Bjork (Bjork, 1992), Ekholm (Ekholm, 2000), KIM (Kim, 2015) et enfin la dernière version du modèle IFC publiée en juillet 2016.

5.2 Représentation des espaces dans les modèles existants

5.2.1 Modèle de Bjork

Développé au centre de recherche technique de Finlande VTT, ce modèle a été proposé par le professeur en science des systèmes d'information B.C Bjork dans l'objectif de structurer l'information sur les espaces et les éléments physiques les délimitant dans le contexte de la modélisation de produits de bâtiment. En se basant sur un travail d'analyse de différents modèles d'espace existants comme RATAS⁵³, GSD⁵⁴ et COMBINE⁵⁵, Bjork a proposé une définition du concept d'espace architectural et des entités nécessaires à sa modélisation. Le

⁵³ RATAS est un programme national pour l'informatique dans la construction qui se compose d'une série de projets qui ont créé des normes volontaires de l'industrie IT, des applications logicielles, etc.

⁵⁴ Groupe de structuration des données.

⁵⁵ Le projet COMBINE est un projet multinational pour l'informatique dans la construction, financé par le programme de recherche de la CE Joule composé de quinze organisations de huit pays européens.

modèle est représenté avec le formalisme graphique EXPRESS-G⁵⁶, associé au langage de description EXPRESS⁵⁷.

a- Les espaces

Selon Bjork, le concept d'espace architectural peut être défini de deux façons complémentaires. L'une est basée sur la séparation des espaces par des obstacles physiques définissant un abri (visuel, acoustique, thermique, etc.) et l'autre est basée sur l'activité, où il doit être le lieu d'une activité homogène (Bjork, 1992). Le modèle de Bjork prend en considération les espaces clos, ainsi que les espaces non clos et fonctionnellement définis et distingue les espaces et les sous-parties d'espaces <Space or subspace> des assemblages d'espaces (figure 27).

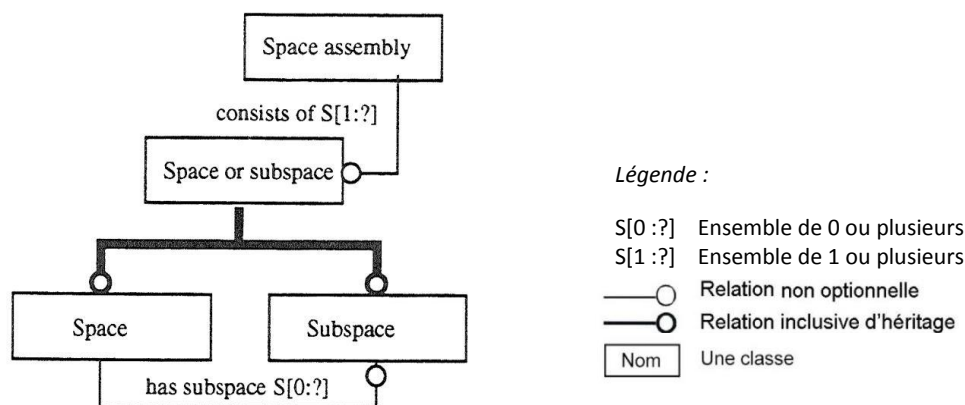


Figure 27 Les abstractions conceptuelles décrivant les espaces (Bjork, 1992).

b- Les limites spatiales

Bjork désigne par « coquille » l'élément fondamental de la limite spatiale composée de murs, plafond, plancher, ouvertures, etc., qui représente un ensemble d'éléments qui abrite l'espace visuellement, thermiquement, et acoustiquement. Cette « coquille » a une texture de surface (ex. peinture, revêtement) qui varie d'un espace à un autre, puisqu'elle peut s'étendre sur plusieurs espaces. Les surfaces visibles à l'intérieur de cette coquille correspondent exactement aux dimensions des espaces intérieurs et désignent ainsi leurs limites spatiales. Le

⁵⁶ Ce formalisme est utilisé principalement pendant les phases préliminaires de conception d'un modèle de données. Il permet une représentation des concepts structurels et descriptifs du modèle de données par une annotation graphique, ce qui augmente sa lisibilité et sa compréhensibilité.

⁵⁷ EXPRESS est un langage formel normalisé pour décrire une structure de base de données orientée objet. Il est défini par une grammaire normalisée (ISO 94 – part 11) compréhensible par l'homme et la machine.

modèle de Bjork propose une généralisation des limites spatiales dans une entité d'assemblage des limites spatiales <Space boundary assembly> et une décomposition en deux types de limites spatiales, à savoir : les limites spatiales physiques (ex. des murs, un plancher, un toit) <Physical space boundary> et celles imaginaires (limites suggérées par un mobilier, une retombée de poutre, quelques marches, etc.) <Imaginary space boundary> (figure 28).

c- Les entités enveloppantes

Dans une situation de conception, l'architecte commence souvent par décrire les structures enveloppantes qui, par leur arrangement spatial, forment les espaces. Ainsi pour Bjork, une structure enveloppante doit être continue et généralement assez homogène dans les propriétés de ses matériaux. Dans ce modèle, l'entité enveloppante <Enclosing entity> est décomposée d'un ensemble de structures enveloppantes <Enclosing structure>, de sections plus petites de ces structures <Enclosing structure section> et d'un ensemble de composants (mur extérieur, mur intérieur, plancher, poteau, poutre, etc.) <Component>. Ce modèle permet d'associer plusieurs structures enveloppantes dans des entités plus importantes : les assemblages des entités enveloppantes <Enclosing entity assembly> (figure 29).

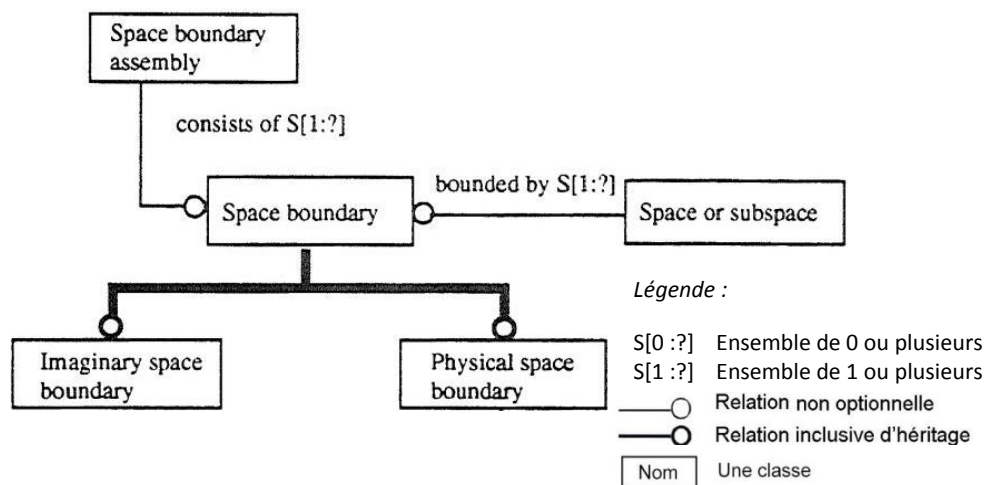


Figure 28 Modélisation conceptuelle des limites spatiales (Bjork, 1992).

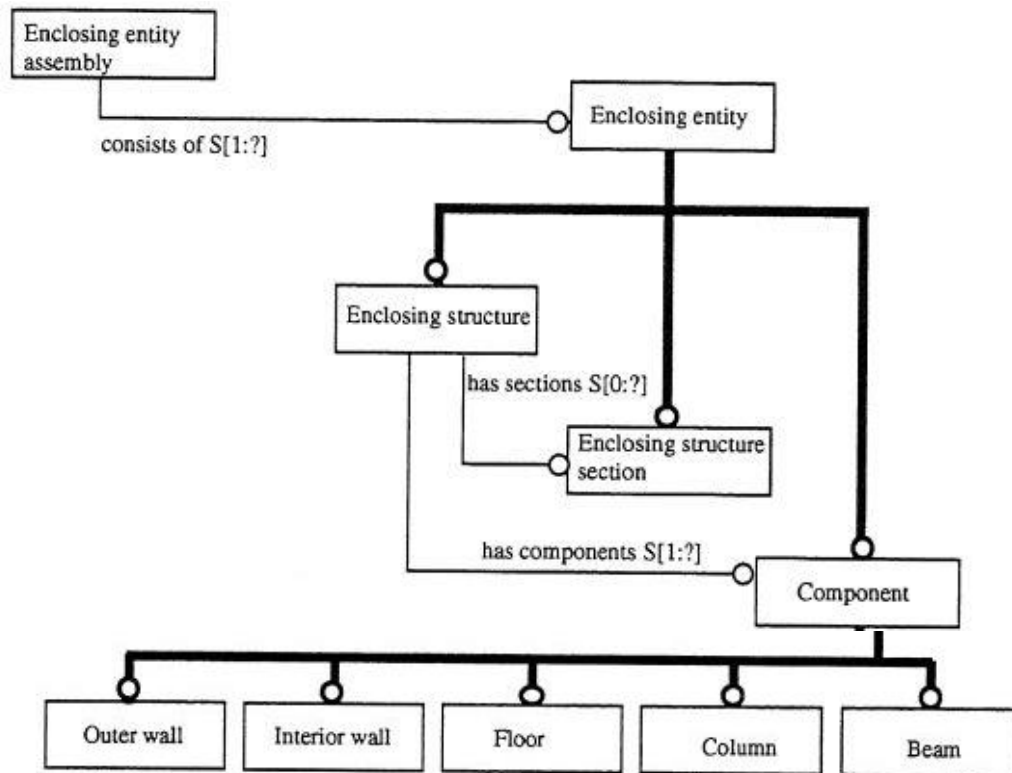


Figure 29 Modélisation conceptuelle des entités enveloppantes (Bjork, 1992)

d- Les ouvertures (trous, portes et fenêtres)

Les ouvertures <Hole> sont définies par Bjork comme des percées dans les entités enveloppantes <Enclosing entity> qui permettent la circulation de personnes, d'air et de lumière. Ces ouvertures sont remplies par des composants d'ouvertures (ex. portes, fenêtres) <Opening component>. Les composants d'ouverture sont modélisés comme des sous-classes des entités enveloppantes. Ils possèdent des relations avec les espaces aussi bien qu'avec les entités enveloppantes (figure 30).

e- Formes et localisation

Pour la description des données de forme et de localisation, toutes les entités de représentation du modèle de Bjork sont des sous-classes d'une entité plus générique de description géométrique, modélisée comme attribut de l'entité de description du bâtiment (figure 31).

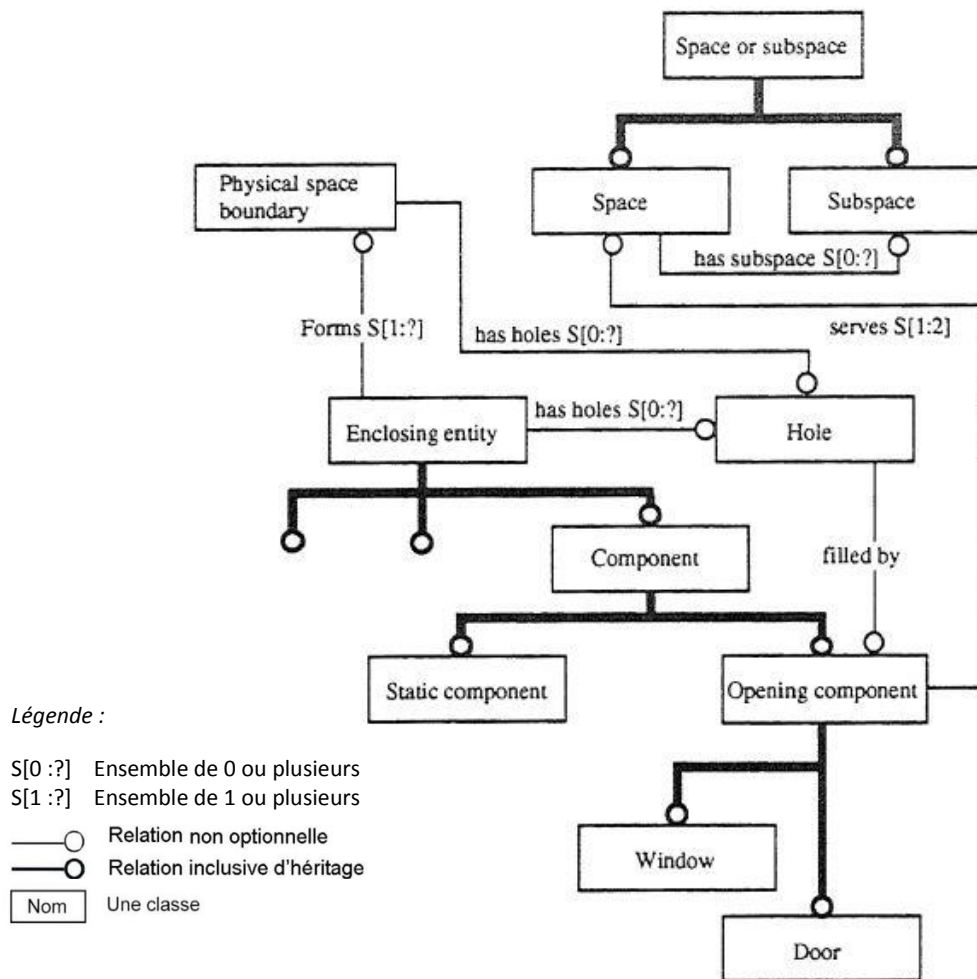


Figure 30 Schéma des ouvertures et leurs relations avec les autres entités (Bjork, 1992).

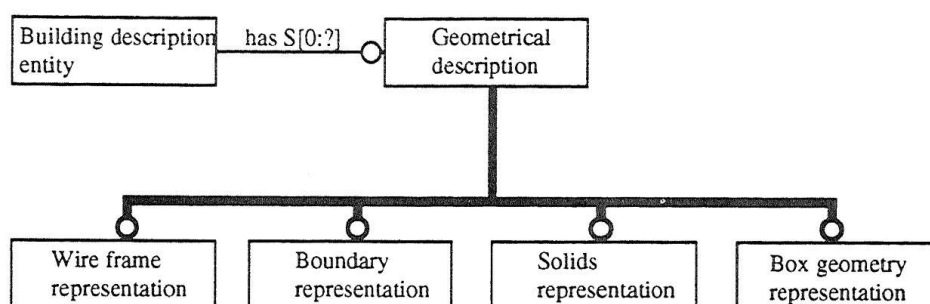
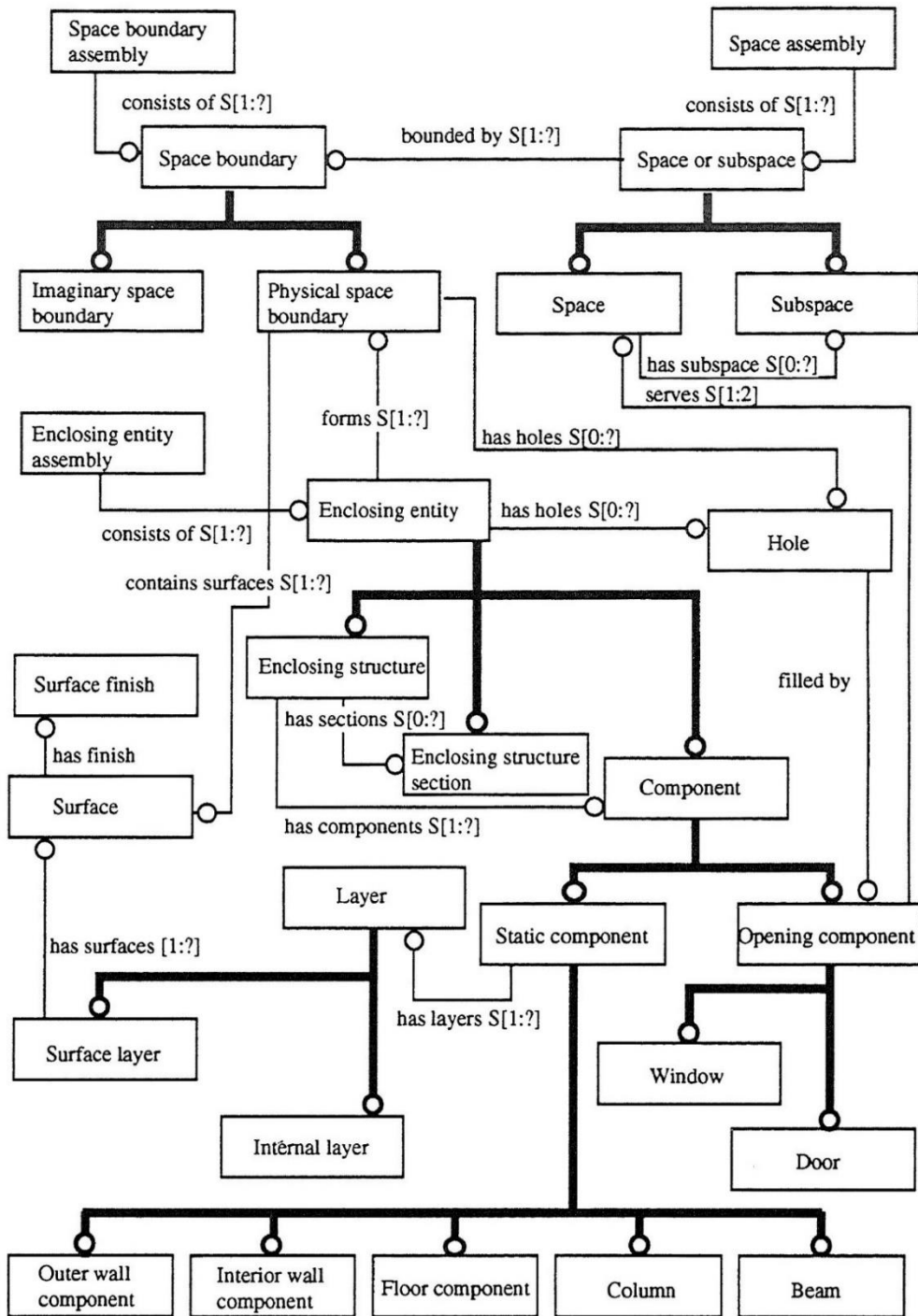


Figure 31 Principe de base de Bjork pour attacher l'information géométrique à la description de l'élément (Bjork, 1992).

Le modèle d'espace proposé par Bjork intègre les différents concepts d'espaces, de limites spatiales, de structures enveloppantes et d'ouvertures (figure 32).

f- Analyse critique

Le modèle proposé par Bjork a été purement théorique au début. Il n'avait été testé qu'ultérieurement par le développement de prototypes dédiés à un certain nombre d'activités de modélisation des données en Finlande. Étant orienté vers la structuration des informations sur les espaces et les entités enveloppantes dans un bâtiment, **ce modèle inclut uniquement des descriptions concernant la représentation des espaces** (leur géométrie, leurs limites et leurs relations avec les ouvrages qui les entourent) **et ne prend pas en compte l'information sur les exigences spatiales de la phase de programmation.**



Légende :

S[0 :?] Ensemble de 0 ou plusieurs

S[1 :?] Ensemble de 1 ou plusieurs

—○ Relation non optionnelle

—● Relation inclusive d'héritage

Nom Une classe

Figure 32 Modèle des espaces, des limites spatiales et des structures enveloppantes (Bjork, 1992)

5.2.2 Modèle d'Ekholm

Ce modèle a été développé à l'institut Lund de technologie au Suède par deux chercheurs Anders Ekholm et Sverker Fridqvist qui se sont intéressés au concept d'espace architectural dans le contexte de la modélisation des données de bâtiments. Selon ces deux chercheurs, les propriétés d'un espace sont déterminées à partir des exigences issues de l'organisation des usagers à l'intérieur des espaces et de la façon dont les espaces sont utilisés par ces usagers. Ainsi, ils distinguent les propriétés spatiales de l'organisation des usagers et celles de l'environnement bâti (Ekholm, 2000). Basés à leur tour sur l'analyse des différents modèles d'espace existants, entre autres, le modèle de Bjork, celui d'Eastman et Siabiris (Eastman C.M., 1995) et par certains formats standards comme ceux proposés par l'IAI, COMBINE et STEP, ces deux chercheurs proposent une nouvelle définition du concept d'espace et des entités nécessaires à sa modélisation dans le contexte du bâtiment.

a- L'espace

Pour Ekholm et Fridqvist l'activité dans un bâtiment est une propriété des usagers et du bâtiment. Si un bâtiment est conçu pour accueillir des usagers avec leurs équipements pour réaliser des activités, alors la relation entre l'utilisateur et le bâtiment est médiatisée par les espaces où les activités se déroulent. Dans ce modèle, l'espace architectural est défini comme un agrégat des entités de construction, avec un vide matériellement ou expérimentalement enfermé pouvant accueillir des usagers ou des équipements (Ekholm, 2000). Les concepts de limites spatiales matérielles et expérimentales correspondent respectivement aux limites physiques et imaginaires du modèle de Bjork, auxquelles Ekholm et Fridqvist ont apporté certaines modifications (figure 33).

b- L'espace d'activité des usagers

Une organisation d'usagers a besoin d'un espace qui permet la réalisation d'une activité. Cet espace est dérivé des formes et des positions des parties de l'organisation (personnes, équipements, etc.) durant le déroulement de l'activité. L'espace nécessaire peut être de différentes échelles, de la plus petite définie par le corps humain et les équipements utilisés, à l'espace déterminé par une organisation dans son ensemble. Ces deux chercheurs stipulent qu'il est nécessaire de décrire l'organisation des usagers et leurs activités relatives à un stade précoce du processus de conception afin d'être en mesure de déterminer leurs exigences respectives sur les espaces du bâtiment.

c- Les entités de construction et les limites spatiales

Les entités de construction désignent dans ce modèle les ouvrages qui nécessitent une fondation au sol et qui représentent des environnements artificiels pour le déroulement des activités ou pour les équipements de l'utilisateur (qui correspondent aux entités enveloppantes du modèle de Bjork). Concernant le concept de limite spatiale, Ekholm et Fridqvist indiquent qu'une limite spatiale peut paraître imaginaire, mais qu'elle est souvent indiquée par une entité physique (ex. une légère différence de hauteurs, un changement de matériaux, des marches, du mobilier, etc.). Ils précisent qu'un espace purement imaginaire comme décrit par Bjork n'est pas pertinent à représenter dans un schéma conceptuel et proposent une illustration de leur point de vue sur le schéma de Bjork par une référence de la limite spatiale imaginaire à l'entité enveloppante (figure 33).

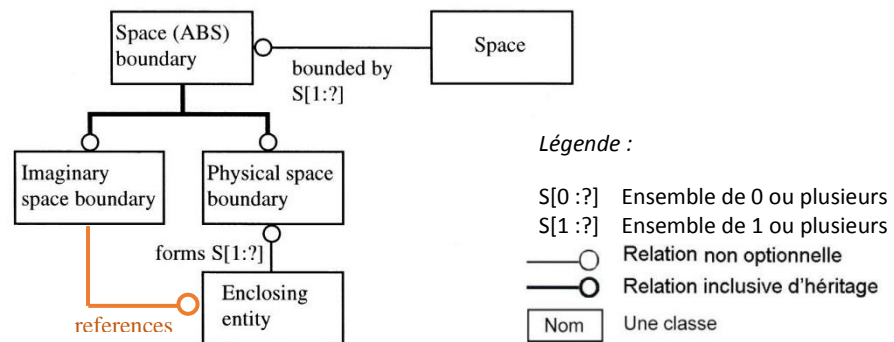


Figure 33 Ajout suggéré sur le modèle de Bjork pour assurer la cohérence avec la vue matérielle de l'espace.

d- La forme

En essayant de définir la forme, Ekholm et Fridqvist précisent qu'elle représente la limite externe d'un objet, définie par des attributs spécifiques (ex. position, hauteur, rayon, etc.). Par exemple, un cylindre peut avoir une position, une hauteur et un rayon, son volume peut être explicite ou dérivé. Une forme <Shape> peut être composée d'autres formes (figure 34). Ainsi, la forme d'un objet composé est basée sur les formes des parties qui le constituent, y compris leurs relations spatiales (ex. la forme d'un mur en briques est basée sur la forme des briques et leurs positions relatives). Selon ces deux chercheurs, la représentation géométrique peut décrire un solide aussi bien qu'un vide. Elle permet de définir par exemple les positions et les dimensions des ouvertures dans les objets, qui sont à remplir par des composants d'ouverture (ex. une porte, une fenêtre). L'ouverture est ainsi une propriété de l'objet dans lequel elle est

située. Le vide représente ainsi une propriété spatiale d'un objet et la description du vide est une partie de la description complète de la forme de l'objet.

Dans ce modèle, les formes sont déterminées par des attributs spécifiques <Shape attributes>. Par exemple, un mur extérieur peut avoir une position, une hauteur, une épaisseur, etc. Il peut également avoir des attributs qui décrivent les ouvertures créées dedans <Void volume>. D'un point de vue informatique, un mécanisme de contrôle <Consistency rule> est ainsi nécessaire pour maintenir la cohérence entre les attributs.

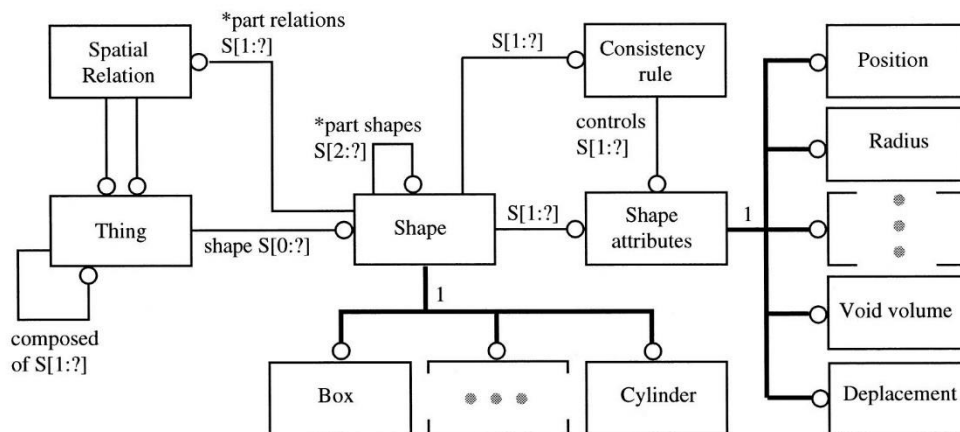


Figure 34 Schéma de la représentation de la forme d'un objet (Ekholm, 2000)

e- Structure principale du modèle d'espace d'Ekholm et Fridqvist

Dans leur modèle (figure 35), Ekholm et Fridqvist considèrent l'espace architectural comme une propriété de l'entité de construction, une unité d'aspect basée sur une vue spatiale qui possède à son tour des propriétés spatiales (ex. volume, hauteur sous plafond, température de l'air, etc.). Durant la conception architecturale, cette unité permet de commencer par la détermination des propriétés des espaces, avant de passer à la détermination des propriétés du reste des éléments.

Le schéma proposé modélise l'espace architectural à travers la classe espace d'entité de construction <Construction entity space>. Un espace est composé d'au moins un élément enveloppant <Enclosing element> et d'une unité d'aspect <Aspectual unit>. La forme d'un espace est définie, non seulement par la forme des éléments qui le délimitent et leurs relations spatiales <Adjacent>, <Surrounding>, etc., mais aussi par l'unité d'aspect qui possède une forme et des relations spatiales. Les propriétés géométriques d'un espace sont représentées par

l'entité forme <Shape> et ses attributs <Shape attributes>. Ce modèle prend en compte l'espace factuel et l'espace expérimenté : le premier existe indépendamment de notre expérience, tandis que le deuxième dépend d'un sujet expérimental, mais possède toujours des référents factuels indiquant ses limites. Ce modèle traite de la coordination spatiale entre l'espace architectural <Construction entity space> et l'organisation des usagers située à l'intérieur <User organisation> et ses propriétés de façon à permettre de déterminer les exigences d'un espace en fonction des besoins des activités pour lesquelles il est conçu.

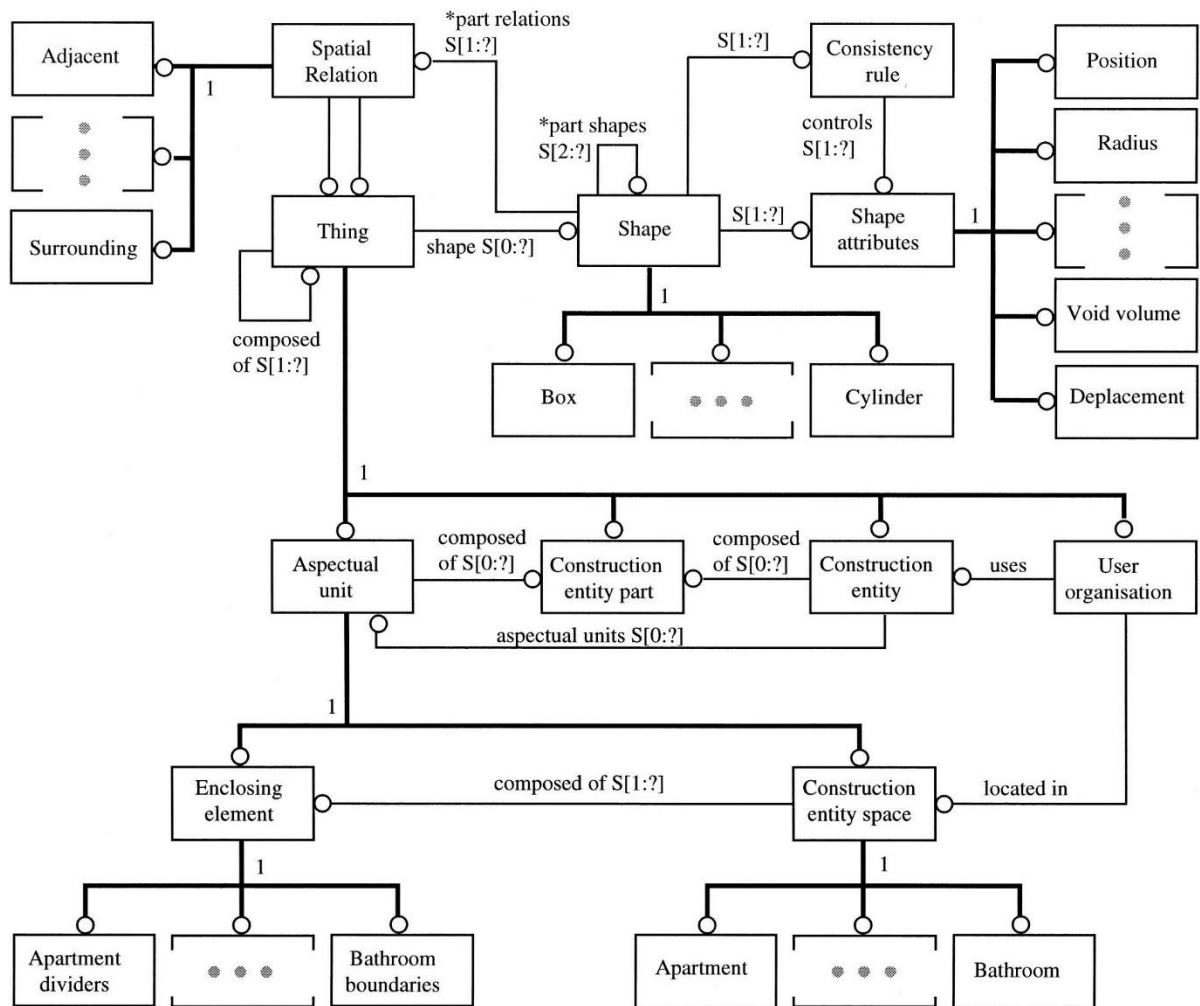


Figure 35 Structure principale du schéma de l'espace d'entité de construction (Ekholm, 2000).

f- Analyse critique

À travers ce modèle, Ekholm et Fridqvist ont essayé de traiter le dilemme de concilier, dans un modèle de produits de bâtiments, une vue matériaux et méthodes de construction avec une vue orientée vers l'espace architectural. Basés sur l'entité de l'organisation des usagers,

ces deux chercheurs ont défini pour l'espace non seulement des propriétés géométriques qui sont représentées par l'entité forme <Shape>, mais aussi d'autres propriétés de relations spatiales comme la contiguïté et la composition en d'autres espaces plus petits. Ils soulignent toutefois la nécessité d'une description plus complète de ces différentes relations.

Ce modèle permet de définir des exigences spatiales pour contrôler les propriétés d'un espace, à travers l'entité <Consistency rule>. **Ces exigences sont géométriques et essentiellement quantitatives, puisque les règles de contrôle des propriétés sont déterminées à partir de l'entité <Shape>.**

5.2.3 Modèle de Kim

Ce modèle est développé par Tae Wan Kim et al. dans le cadre d'une coopération internationale entre trois institutions, à savoir : le *Department of Architecture and Civil Engineering, City University, Hong Kong* – le *Department of Architecture, University of Cambridge, United Kingdom* – et le *Center for Integrated Facility Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, USA*. Il a pour objectif de formaliser la relation entre les exigences de conception et les informations sur les usagers afin de proposer une méthode de mise à jour automatisée des exigences spatiales d'occupation (nombre d'usagers, quantité d'événements, charge de l'activité, occupation désirée, etc.).

a- Classification des exigences spatiales

Ce modèle (Kim, 2015) spécifie deux classes d'exigences spatiales, à savoir (figure 36):

- les exigences basées sur les activités <Activity-based requirement>, qui sont les exigences spatiales permettant d'accueillir ou de recevoir les activités des usagers (ex. le mobilier de la cuisine pour l'activité *manger*).
- les exigences reposant sur l'espace <Space based requirement>, ce sont les exigences spatiales nécessaires, quelle que soit l'activité de l'utilisateur dans l'espace et qui sont souvent d'origine réglementaire (ex. les heures d'ouverture d'un espace). Ces exigences se définissent sur un type d'espace <Space type requirement> ou sur un super-type d'espace <Space super-type requirement> quand un espace contient plusieurs types d'espace. Par exemple, une salle de cours appartient au <Space type> « salle de cours » et au <Space super type> « salle ». Cette pièce peut recevoir deux exigences lumineuses : une demandée

par le super type d'espace, en tant que « salle » (valeur minimale d'éclairage 300 Lux) et l'autre demandée par le type d'espace, en tant que « salle de cours » (valeur minimale d'éclairage 400 Lux). Pour définir la valeur d'exigence à attribuer finalement à cet espace, Kim propose un mécanisme de mise à jour automatique des exigences spatiales qui attribue à l'espace la valeur d'exigence la plus restrictive (qui correspond à la valeur minimale de 400 Lux dans cet exemple).

Dans ce modèle, les propriétés communes dont disposent les exigences spatiales sont le nom de l'exigence <Name>, son type <Requirement type>, une description qui en mémorise des informations plus détaillées <Description> et enfin les valeurs maximale <Maximum value> et minimale <Minimum value> de l'exigence. Par exemple, l'exigence de surface d'un espace peut avoir le nom (Surface prévue), le type (Surface) et la description (espace pour deux collaborateurs, chacun a besoin d'au moins 6m²) avec une valeur maximale de (16m²) et une valeur minimale de (12m²). Kim précise que le type d'exigence <Requirement type> peut également être non quantifiable (ex. zone demandée pour un espace, espaces adjacents).

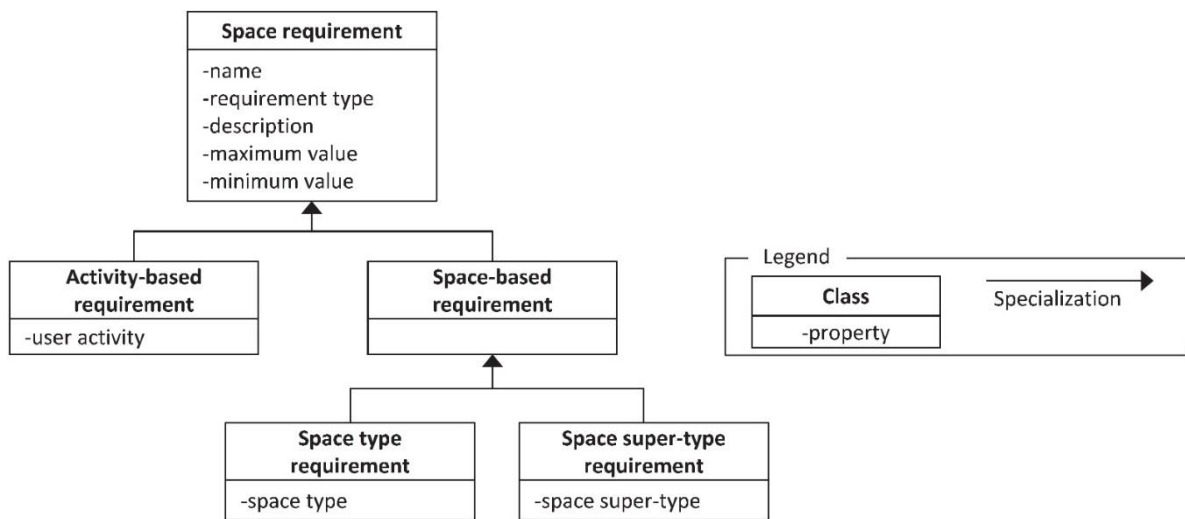


Figure 36 Schéma de classification des exigences spatiales (Kim, 2015).

b- Relations entre les espaces, les usagers et les exigences spatiales

Kim formalise les relations entre les espaces, les usagers et les exigences spatiales pour permettre à un système informatique de suivre et de documenter automatiquement l'effet d'une modification de l'un de ces concepts sur les deux autres (figure 37). Le modèle des exigences <Requirements model> (figure 37-a) qui identifie trois classes d'exigences, à savoir :

les exigences basées sur l'activité <Activity-based requirement>, celles de type d'espace <Space type requirement> et celles de super-type d'espace <Space super type requirement>.

L'activité des usagers <user activity> est définie par Kim comme une action d'un groupe d'usagers nécessitant l'occupation d'espaces. Il distingue la notion d'action à celle d'activité par le fait qu'une action ne peut être définie qu'une fois (ex. avoir cours), puis être utilisée par des activités (ex. les étudiants du premier cycle ayant cours, les étudiants du deuxième cycle ayant cours). Par conséquent, le modèle des usagers <User model> (figure 37-b) comporte les concepts d'action <Action>, de groupe d'usagers <User group> et d'activité des usagers <User activity>. Le modèle des usagers <User model> est connecté au modèle des exigences <Requirement model> à travers l'entité d'activité des usagers <User activity> qui peut être en relation directe soit avec les exigences basées sur l'activité <Activity-based requirement>, soit avec les exigences basées sur l'espace <Space based requirement> à travers l'entité de type d'espace <Space type>.

Quant au modèle de produit <Product model> (figure 37-c), il est défini par Kim comme le modèle BIM contenant des instances des espaces. La relation entre le modèle de produit et le modèle des exigences permet à un système informatique de contrôler si une solution de conception répond aux exigences en comparant les caractéristiques des instances d'espace aux exigences spécifiées.

Basé sur ces modèles, Kim a développé une méthode de mise à jour automatique des exigences de nombre d'espace lors du changement des informations sur les usagers par l'architecte. Cette démarche se compose de trois phases : (1) mise à jour des informations sur les usagers par l'architecte, (2) mise à jour automatique des exigences pour chaque type d'espace, et (3) mise à jour automatique du nombre de chaque type d'espace requis (Kim, 2015).

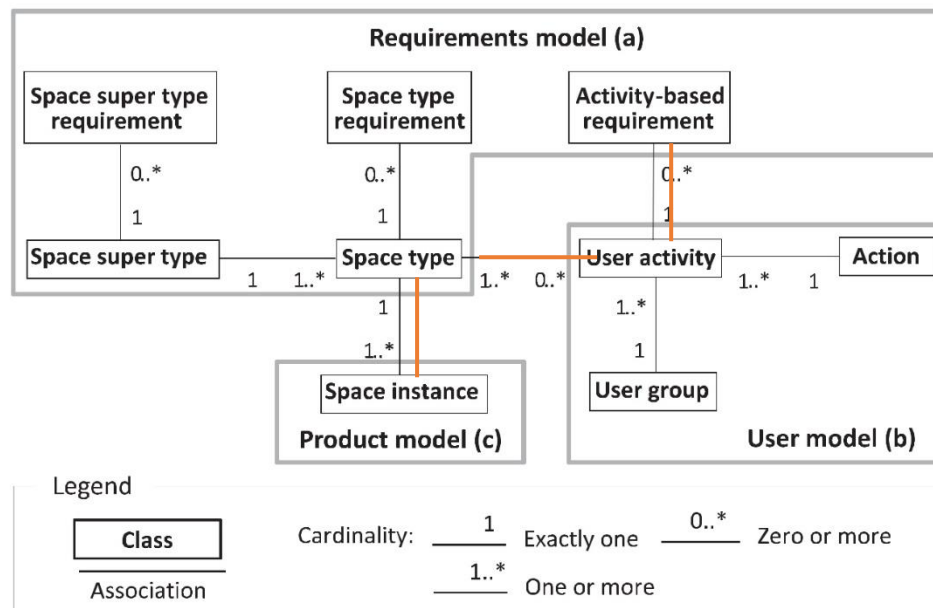


Figure 37 Représentation de la relation entre les espaces, les usagers et les exigences spatiales (Kim, 2015).

c- Analyse critique

Ce travail de modélisation porte sur la formalisation des relations entre les exigences spatiales, les informations sur les usagers et les modèles produits (modèles BIM). Basé sur les modèles ainsi définis, Kim propose une méthode pour la mise à jour automatique des exigences spatiales d'occupation. La validation de cette méthode a été effectuée sur deux étapes, d'abord par le développement d'un prototype basé sur cette méthode et ensuite par l'expérimentation de ce prototype dans un milieu de conception réel (auprès de 7 architectes) ce qui a démontré la validité de cette méthode et l'utilité de son utilisation dans le milieu professionnel.

Le présent modèle s'intéresse aux données sur les exigences spatiales d'occupation, essentiellement celles quantitatives (ex. surface par occupant, nombre d'occupants, durée d'occupation, etc.) Dans l'explication de son modèle, Kim précise qu'une exigence peut être qualitative telle que la localisation ou la zone demandée pour un espace, les espaces auxquels il doit être adjacent, etc. **Néanmoins, ces exigences qualitatives sont évoquées dans l'étude de Kim à titre indicatif et ne sont ni représentées dans son modèle ni prises en compte par la méthode de mise à jour des exigences proposée** (Kim, 2015).

5.2.4 Modèle IFC

Dans un travail de recherche ultérieur⁵⁸, nous avons analysé le modèle d'espace tel qu'il est spécifié par les IFC dans la version IFC 2x4 RC3 (publiée en 2011). Pour ce faire, différents diagrammes EXPRESS-G simplifiés⁵⁹ ont été schématisés synthétisant les concepts autour de l'entité *IfcSpace*. Dans le présent travail d'analyse, nous nous basons sur ces schémas, spécifiquement ceux relatifs au graphe d'héritage de l'entité *IfcSpace*, décrivant les propriétés et les différentes relations avec les autres entités présentes dans un bâtiment. Ces schémas sont repris à l'aide de l'application d'écriture EXPRESS-G Draw.io⁶⁰ et mis à jour suivant les dernières spécifications du concept d'espace architectural de la version IFC Add2⁶¹ publiée en juillet 2016 (figure 38, en EXPRESS).

```
ENTITY IfcSpace
  SUBTYPE OF (IfcSpatialStructureElement);
  PredefinedType : OPTIONAL IfcSpaceTypeEnum;
  ElevationWithFlooring : OPTIONAL IfcLengthMeasure;
  INVERSE
  HasCoverings : SET [0:?] OF IfcRelCoversSpaces FOR RelatingSpace;
  BoundedBy : SET [0:?] OF IfcRelSpaceBoundary FOR RelatingSpace;
  WHERE
  CorrectPredefinedType : NOT(EXISTS(PredefinedType)) OR
  (PredefinedType <> IfcSpaceTypeEnum.USERDEFINED) OR
  ((PredefinedType = IfcSpaceTypeEnum.USERDEFINED) AND EXISTS
  (SELF\IfcObject.ObjectType));
  CorrectTypeAssigned : (SIZEOF(IsTypedBy) = 0) OR
  ('IFCPRODUCTEXTENSION.IfSpaceType' IN
  TYPEOF(SELF\IfcObject.IsTypedBy[1].RelatingType));
  END_ENTITY;
```

Figure 38 Spécification formelle de l'entité *IfcSpace* en langage EXPRESS⁶².

Dans ces spécifications, l'espace architectural est un sous-type de la structure spatiale d'un bâtiment qui peut appartenir à un type d'espaces bien défini et avoir une hauteur de sous plafond bien précise. Il est délimité par un ensemble d'ouvrages.

⁵⁸ Mémoire de master de recherche en sciences de l'architecture, intitulée : *Pertinence de la notion d'espace architectural dans le processus de la conception coopérative. Vers des pratiques coopératives orientées « espaces »*.

⁵⁹ La spécification des IFC autour de l'entité *IfcSpace* est assez détaillée avec un schéma EXPRESS-G qui s'étale sur une douzaine de pages.

⁶⁰ <https://www.draw.io/>

⁶¹ <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/>

⁶² <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/link/annex-d.htm>

a- Définition de l'entité espace

L'espace est défini dans les IFC comme une zone ou un volume limité réellement ou théoriquement qui permet la réalisation des fonctions au sein d'un bâtiment. Le modèle des espaces définit trois entités : *COMPLEX* (groupe d'espaces), *ELEMENT* (espace) et *PARTIAL* (espace partiel)⁶³. L'entité *IfcSpace* est utilisée dans ce modèle pour construire la structure spatiale d'un bâtiment (figure 39), où un projet de bâtiment *<IfcObject>*⁶⁴ est composé d'un ensemble de produits *<IfcProduct>*⁶⁵ qui se composent à leurs tours d'éléments de bâtiment entre ouvrages *<IfcElement>* et éléments spatiaux *<IfcSpatialElement>*⁶⁶. Les éléments spatiaux rassemblent les éléments de structure spatiale *<IfcSpatialStructureElement>*⁶⁷ qui sont composés enfin d'un ensemble d'espaces *<IfcSpace>*. Un espace *<IfcSpace>* est relié aux éléments le délimitant à travers la relation *<BoundedBy>* à l'entité de relation de limite spatiale *<IfcRelSpaceBoundary>*⁶⁸ qui définit ses délimiteurs physiques ou virtuels. Il est relié également aux matériaux de revêtement de ses limites (ex. revêtement mural, revêtement de sol) à travers la relation *<HasCoverings>* à l'entité de relation de revêtement *<IfcRelCovers Spaces>*.

Dans le modèle IFC, l'espace possède quatre attributs : un nom unique, un nom complet, une description et un type qui indique généralement sa catégorie fonctionnelle (ex. espace intérieur, espace extérieur, parking, etc.). Sa représentation géométrique est donnée par l'attribut de forme *<IfcProductDefinitionShape>* et l'attribut de localisation *<IfcLocal Placement>*. Ce modèle spécifie des jeux de propriétés *<PropertySet>* qui permettent d'associer aux espaces un ensemble d'exigences, entre autres :

- des exigences communes qui mentionnent les besoins en matière de surface (ex. surface brute, surface nette), le type de l'espace (s'il s'agit d'un espace extérieur), etc.,
- des exigences de revêtement (ex. type et épaisseur du revêtement),
- des exigences d'occupation (ex. nombre d'occupants, durée de l'activité),
- des exigences de sécurité incendie (ex. facteur de risque incendie),

⁶³ <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/>

⁶⁴ Un *<IfcObject>* est la généralisation de tout processus traité sémantiquement comme les ouvrages et les espaces du projet. Il désigne également les processus (ex. les tâches), les contrôles (ex. les éléments de coût), ou les acteurs (ex. les personnes impliquées dans la conception).

⁶⁵ *IfcProduct* est une représentation abstraite de tout objet lié à un contexte géométrique ou spatial.

⁶⁶ *IfcSpatialElement* est la généralisation de tous les éléments spatiaux pouvant être utilisés pour définir une structure spatiale ou une décomposition hiérarchique du projet.

⁶⁷ Un élément de structure spatiale est la généralisation de tous les éléments spatiaux pouvant être utilisés pour définir une structure spatiale (ex. site, bâtiment, étage, espace).

⁶⁸ L'abréviation « *IfcRel* » désigne une relation représentée sous forme d'entité ?!

- des exigences thermiques (ex. température minimale et maximale durant les périodes de chauffe).

Les exigences spatiales définies par le modèle IFC (annexe 4) sont en majorité quantitatives (71%), au niveau desquelles il s'agit de définir pour un espace différentes mesures, selon le type d'exigence en question (ex. *IfcAreaMeasure*, *IfcCountMeasure*, *IfcLengthMeasure*, *IfcPowerMeasure*, etc.). Les exigences d'ordre qualitatif ne dépassant pas les 30%. Il s'agit essentiellement des données de type booléen (vrai ou faux) pour indiquer si l'espace nécessite un type d'exigence (ex. si l'espace comprend un faux plafond, s'il nécessite un conditionnement d'air, s'il est destiné au stockage de matières inflammables, etc.), Ou encore des données de type label (*IfcLabel*) pour mentionner l'usage type d'un espace, la nature du revêtement associé, etc.

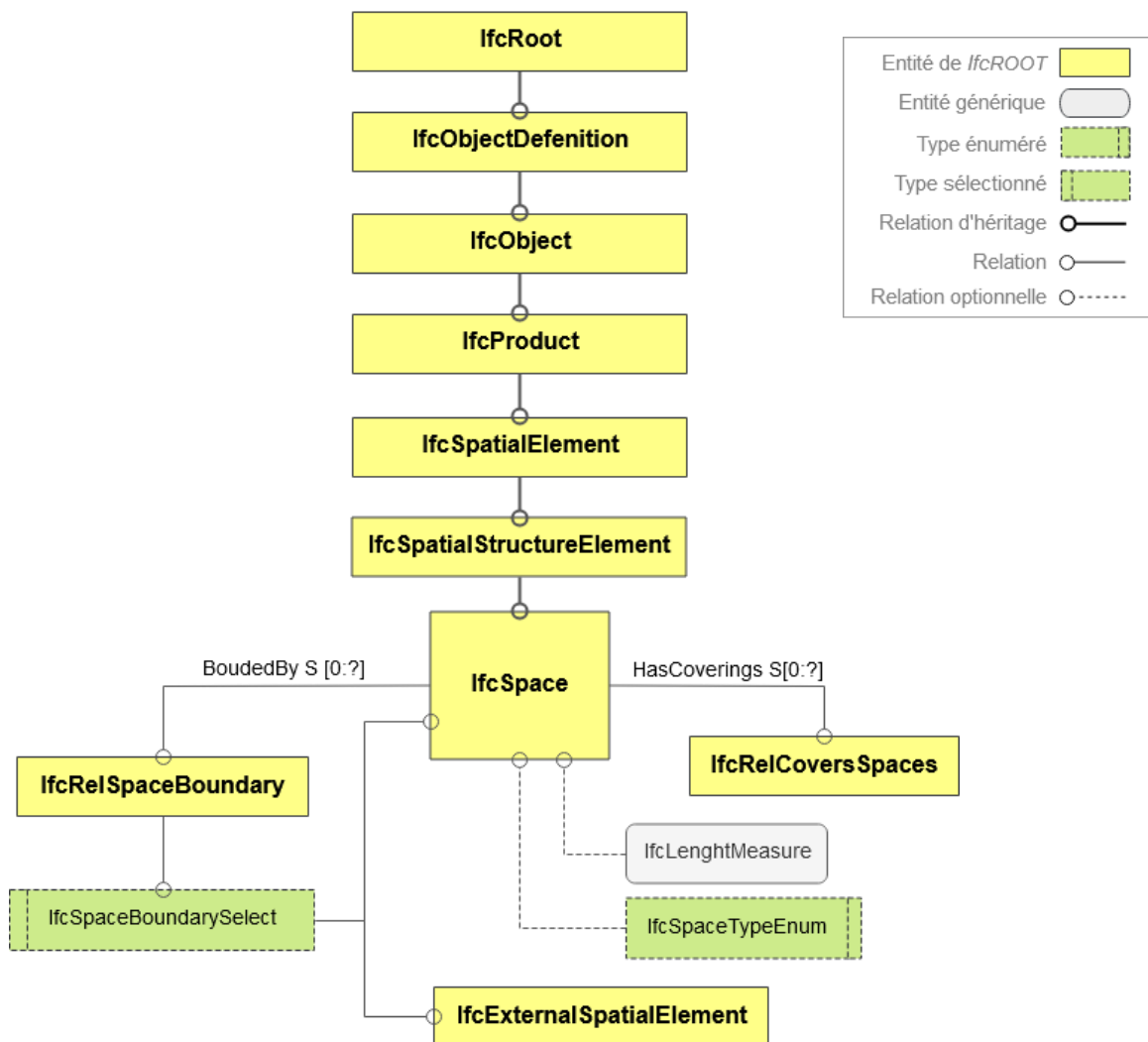


Figure 39 Schéma simplifié de l'entité *IfcSpace* avec son graphe linéaire d'héritage depuis *IfcRoot*, ses propriétés et ses relations (version IFC4 Add2).

b- Les limites spatiales

Selon la définition des IFC, la limite spatiale définit le délimiteur physique ou virtuel d'un espace par la relation *IfcRelSpaceBoundary* avec les éléments qui l'entourent. Quand la limite est physique, sa localisation et sa forme sont données et l'élément physique est référencé. Quand elle est virtuelle, sa localisation et sa forme sont également données, mais dans ce cas un élément virtuel est référencé. Dans ce modèle la limite spatiale est représentée par l'entité <*IfcRelSpaceBoundary*> qui est décomposée en deux niveaux (figure 40) :

- le premier niveau <*IfcRelSpaceBoundary1stLevel*> correspond à la vue architecturale. Il définit la limite spatiale totalement de l'intérieur de l'espace,
- Le deuxième niveau <*IfcRelSpaceBoundary2ndLevel*> correspond à la vue thermique dans laquelle la limite spatiale dépend des matériaux des éléments qui la forment et des espaces adjacents.

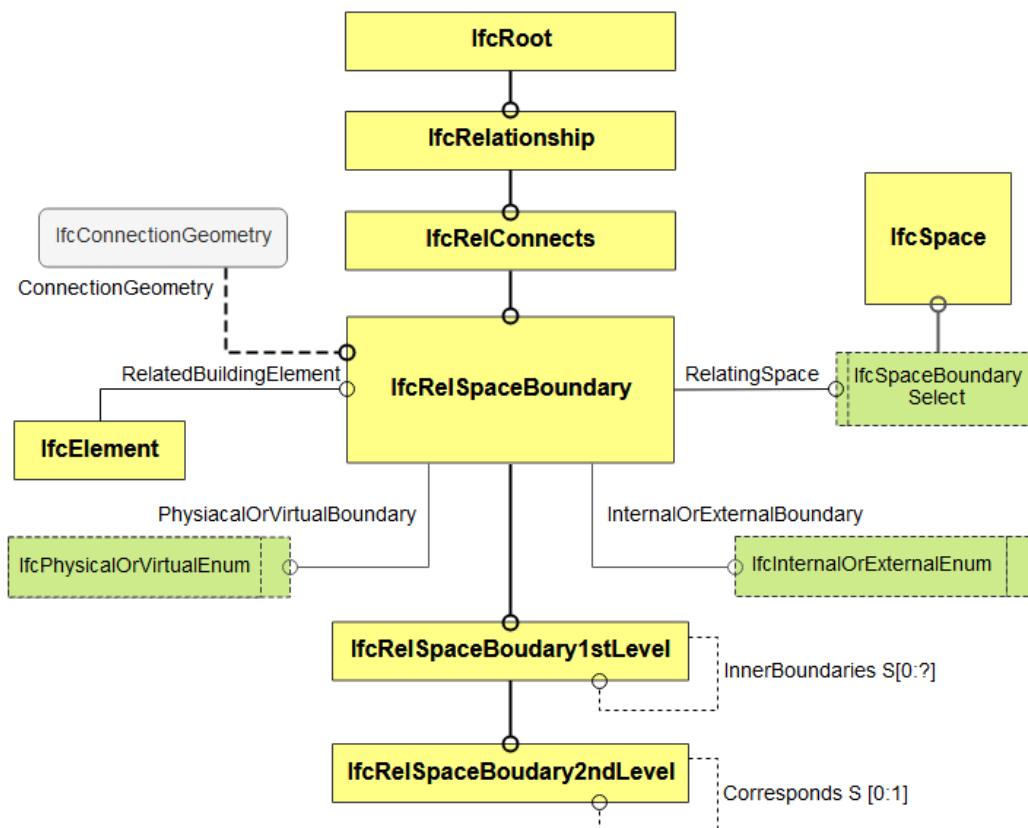


Figure 40 Schéma simplifié de la spécification des limites spatiales (version IFC4 Add2).

c- Les éléments du bâtiment

L'entité *<IfcElement>* est la généralisation de tous les composants présents dans un bâtiment. Elle représente les objets physiquement existants, y compris les éléments vides comme les trous. Un élément *<IfcElement>* (figure 41) est en relation *<IfcRelContainedInSpatialStructure>* avec un élément de structure spatiale (ex. site, bâtiment, niveau, espace). Les informations concernant la géométrie, les propriétés, les quantités et les matériaux sont attribués aux éléments à travers les relations *<IfcRelAssociateMaterial>* et *<IfcRelDefinesByProprietes>*. Dans ce modèle, un élément peut être considéré comme une occurrence spécifique d'un type d'élément (définie par les propriétés du type d'élément à l'aide de la relation *<IfcRelDefinesByType>*). Il peut également être considéré comme un assemblage constitué d'un groupe d'éléments sémantiquement et topologiquement liés (définis par la relation *<IfcRelAggregates>*).

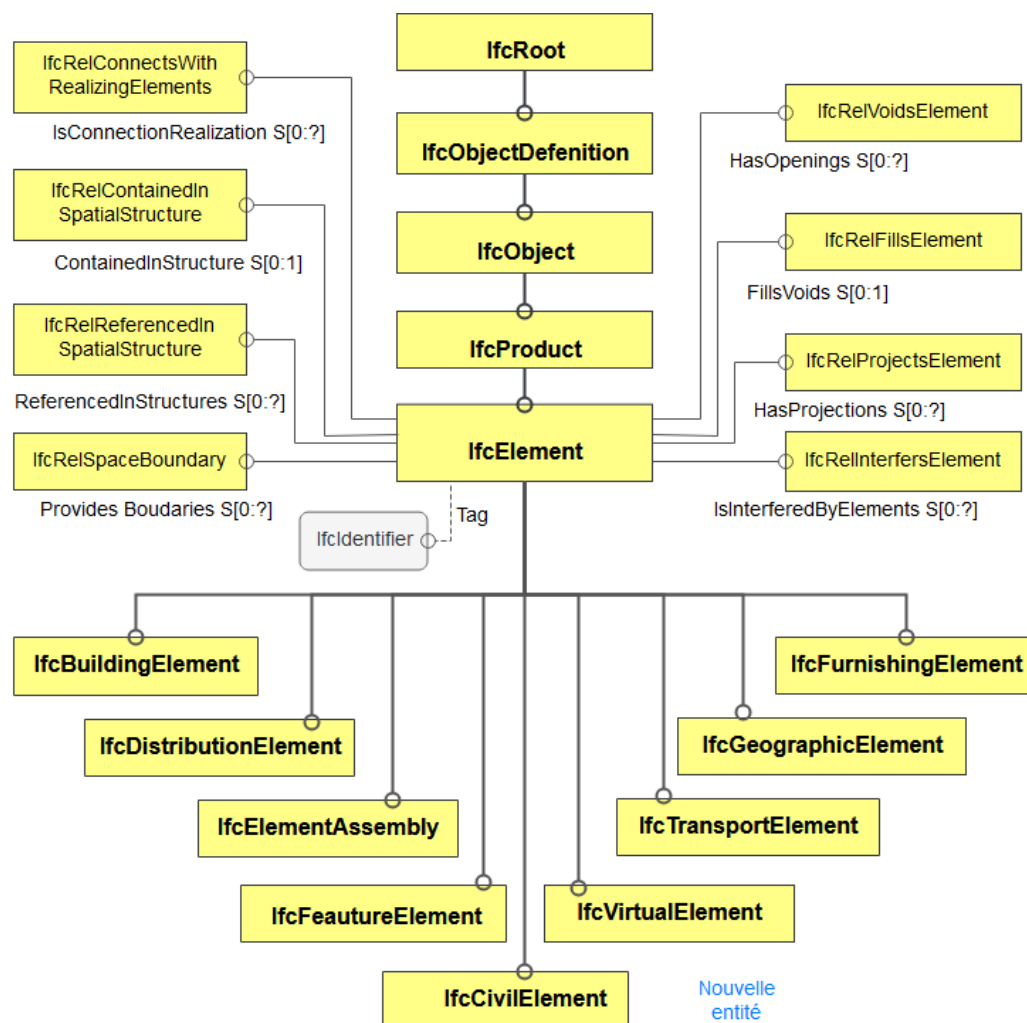


Figure 41 Schéma simplifié de la spécification des éléments de bâtiment (version IFC4 Add2).

d- Les éléments de structure spatiale

Un élément de structure spatiale est défini comme la généralisation de tous les éléments spatiaux qui peuvent être utilisés pour définir une structure spatiale. Une structure spatiale (figure 42) peut avoir autant de niveaux de décomposition que nécessaire. Elle contient généralement : le site <IfcSite>, le bâtiment <IfcBuilding>, les niveaux du bâtiment <IfcBuildingStorey> et les espaces <IfcSpace>. Elle peut contenir également des regroupements ou des parties de ces derniers.

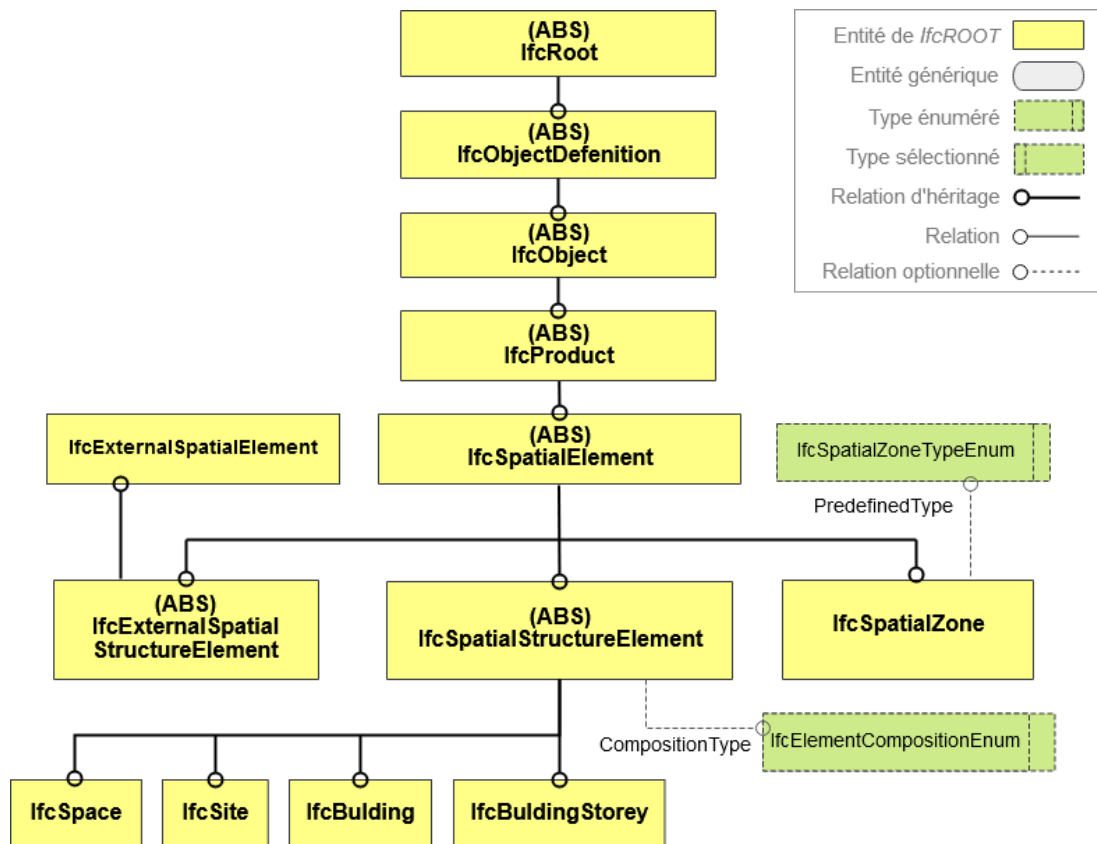


Figure 42 Schéma simplifié de la spécification des éléments de structure spatiale (version IFC4 Add2).

e- Les ouvertures

L'entité <IfcOpeningElement> représente les ouvertures, les niches, les réserves de conduites, etc. Une ouverture est définie comme un vide qui possède une manifestation physique à l'intérieur d'un élément de bâtiment (ex. un mur, une dalle, une poutre, etc.). Ces ouvertures sont représentées géométriquement par les attributs de forme et de localisation

<IfcProductDefenitionShape> et <IfcLocalPlacement>. Les IFC définissent deux entités d'ouverture (figure 43), à savoir :

- <IfcOpeningStandardCase> pour les ouvertures qui ont un profil constant le long d'une extrusion linéaire qui traverse toute l'épaisseur du trou (ouverture réelle,
- <IfcOpeningElement> pour les ouvertures qui ne traversent pas toute l'épaisseur du trou (ex. une niche).

La distinction entre ces deux types d'ouverture est représentée par l'attribut <PredefinedType>⁶⁹ qui mentionne (OPENING) pour une ouverture et (RECESS) pour une niche. L'insertion d'une ouverture dans un élément de bâtiment s'effectue en utilisant la relation <IfcRelVoidsElement>, la relation implique une opération de soustraction entre le volume de l'élément évidé et le volume de l'ouverture. Ce volume peut être ensuite rempli par un élément de remplissage, une porte <IfcDoor>, une fenêtre <IfcWindow> ou autres, par l'intermédiaire de la relation de remplissage <IfcRelFillsElements>.

Au regard de la complexité du schéma global du modèle décrivant la spécification des IFC pour le concept d'espace, ses propriétés et ses différentes relations, nous proposons une synthèse simplifiée intégrant les schémas précédents (figure 44).

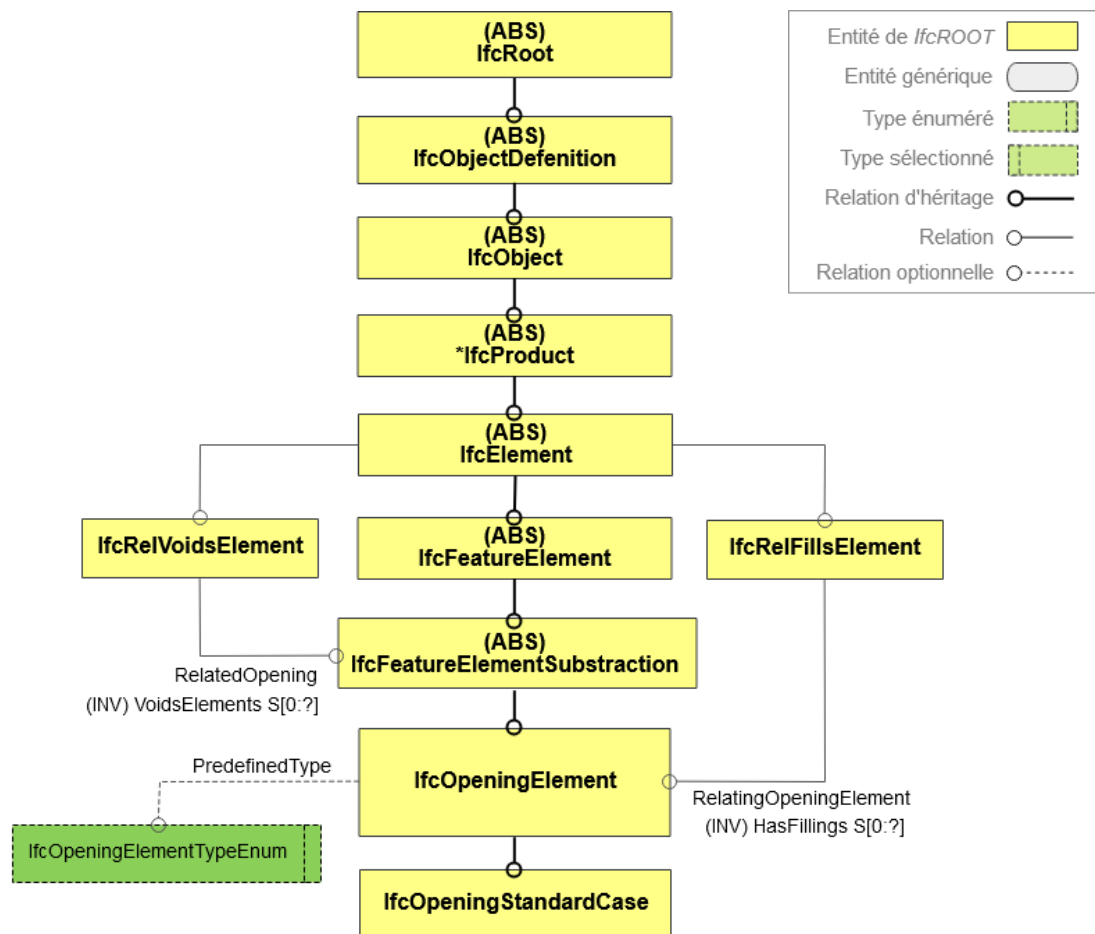
f- Analyse critique

Le modèle IFC prend en compte l'ensemble des composants d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie, les spécifications prennent en compte aussi bien les exigences spatiales de la phase de programmation que les informations de la phase de conception. Les différentes informations concernant les objets du bâtiment, y compris les espaces, sont traitées dans le modèle IFC sous forme d'un ensemble d'attributs attachés aux différentes entités par des relations génériques. Les données prises en compte par ce modèle sont : les données de forme <IfcProductDefenitionShape>, de localisation <IfcLocalPLacement>, de quantité <QuantitySet AssignmentConcept>, les propriétés et les exigences <IfcRelDefinesByProperties>, et celles concernant les matériaux <IfcRelAssociateMaterial>.

Ce modèle prend en compte un large éventail d'informations concernant les exigences de la phase de programmation. Nous rappelons ici que ces exigences ont été intégrées au modèle IFC dans la version IFC 2x3, à travers le format BPie (Building Programming Information

⁶⁹ Cet attribut est ajouté à la liste des attributs dans la version IFC 4, publiée en mars 2013.

Exchange) qui a permis d'intégrer au format IFC certaines exigences spatiales d'ordre qualitatif (section 2.2.2). **Ce modèle reste toutefois orienté vers les informations quantitatives. Les seules exigences spatiales qualitatives qu'il prend en compte sont celles de type booléen** (vrai ou faux) indiquant si l'espace nécessite un certain type d'exigence comme : besoin d'un faux plafond, besoin d'un conditionnement d'air, s'il est destiné au stockage de matières inflammables, etc.), **ou encore les données de type label** pour mentionner l'usage type d'un espace, la nature de son revêtement, etc. (annexe 4).



Bien que le modèle IFC reste le modèle de données de bâtiment qui couvre le plus grand nombre d'informations sur le bâtiment tout au long de son cycle de vie, **certaines concepts en relation avec l'espace architectural se trouvent encore ignorés**. Nous citons parmi ces concepts, **les usagers du bâtiment et leurs activités à l'intérieur de ses espaces**. En effet, si un bâtiment est conçu c'est pour fournir aux futurs usagers du bâtiment un certain nombre d'espaces, où chaque espace doit permettre le déroulement d'un ensemble d'activités bien définies. La prise en compte des concepts d'usagers et d'activité permet ainsi d'élargir encore

plus la couverture du format IFC pour inclure plus d'informations concernant les espaces (notamment les exigences spatiales définies par le format UFPORT (Universal Format for an Architectural Program Of Requirements)).

Il est également à noter que **certaines relations liées au concept d'espace architectural ne sont pas prises en compte dans le modèle IFC comme les relations fonctionnelles entre les ouvertures et les espaces**. Ce modèle représente les relations d'évidement entre les ouvertures et les ouvrages du bâtiment. Il précise également les relations de remplissage entre les ouvertures et les composants d'ouvertures (ex. portes, fenêtres), mais ne prend pas en compte les relations entre les ouvertures et les espaces. Bien que, si des ouvertures sont prévues dans un bâtiment c'est dans l'objectif de desservir les espaces, de les éclairer et de les aérer. La prise en compte de ces relations dans les modèles de données de bâtiment permet de faciliter par la suite le contrôle de l'accessibilité des espaces et le confort à l'intérieur (ex. éclairage naturel, aération naturelle, etc.).

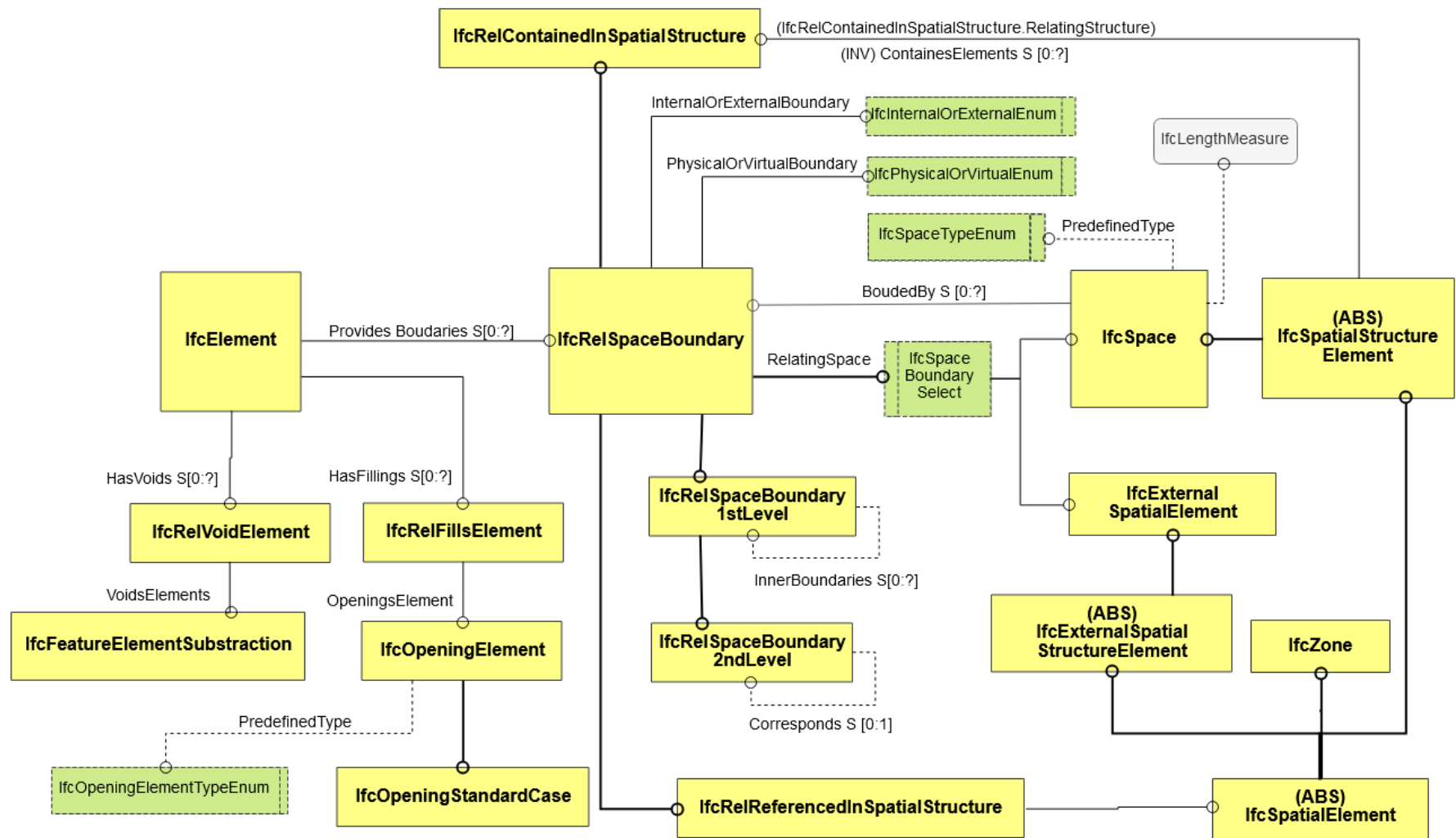


Figure 44 Schéma de synthèse simplifié de la spécification du modèle IFC autour du concept d'espace architectural (version IFC4 Add2).

5.3 Capacité des modèles étudiés à prendre en compte les ESQ_L

Nous nous intéressons dans cette étape à l'étude de la capacité des différents modèles étudiés à prendre en compte et à structurer l'information sur l'espace architectural, spécialement celle portant sur les ESQ_L. Or, il a été constaté au cours de l'exploration des modèles que la plupart d'entre eux se concentrent sur l'espace architectural conçu ou construit et ne prend pas en considération les exigences spatiales déterminées en amont de la phase de conception et qui sont indispensables au bon déroulement de cette phase. Un tableau comparatif sur la capacité des modèles étudiés à représenter les informations sur les espaces a été préparé. Ce tableau est divisé en deux parties (tableau 10), à savoir :

- une première partie identifie les informations prises en compte sur les espaces en phase de programmation architecturale. Il s'agit des exigences spatiales qui sont réparties à leur tour en deux parties : les exigences quantitatives ESQ_N (regroupant les exigences de forme, de quantité, de position et d'occupation) et les exigences qualitatives (ESQ_L) définies dans le chapitre 3 (d'accessibilité, de topologie et de confort),
- une deuxième partie porte sur la phase de conception (et de construction). Elle englobe à son tour les données quantitatives de forme, de quantité et de position et une donnée qualitative sur la topologie des espaces dans le bâtiment.

	Phase de programmation							Phase de conception			
	Exigences quantitatives				ESQ			Données quantitatives			Données qualitatives
	Forme	Quantité	Position	Occupation	Accessibilité	Topologie	Confort	Forme	Quantité	Position	Topologie
<i>Bjork (1992)</i>								x	x	x	x
<i>Ekholm (2000)</i>	x	x	x			x*		x	x	x	x
<i>KIM (2015)</i>	x	x		x							
<i>IFC (2016)</i>	x	x	x	x	x*		x*	x	x	x	x

Légende :

- x Inclut
- x* Inclut en partie
- ESQ définies au chapitre

Tableau 10 Capacité des modèles analysés à prendre en compte les données sur les espaces.

Il a été constaté à travers ce travail d'analyse que la plupart des modèles existants se concentrent sur la modélisation des informations concernant l'espace architectural conçu ou construit. Ils proposent une modélisation des informations sur l'espace architectural dans le bâtiment incluant des données quantitatives portant sur la forme des espaces, leur quantité et leur position avec certaines données qualitatives décrivant leur topologie dans le bâtiment.

Parmi ces modèles, ceux de Bjork et d'Ekholm et Fridqvist étudient plus particulièrement la modélisation de la topologie des espaces en phase de conception.

En distinguant les propriétés de l'organisation des usagers et les propriétés de l'environnement bâti, **Ekholm et Fridqvist ont été les premiers chercheurs à avoir intégré dans leurs modèles des réflexions portant sur les exigences spatiales** ou encore sur les propriétés spatiales nécessaires à l'activité des usagers. Bien qu'ils considèrent l'organisation des usagers comme un objet ayant des relations spatiales comme la contiguïté et l'alentours (figure 35), **ces deux chercheurs ne proposent pas une énumération claire ou une structuration des exigences spatiales topologiques.**

Quant au modèle de KIM, il spécifie deux types d'exigences spatiales, à savoir : les exigences basées sur l'activité et celles basées sur l'espace (figure 36). **Parmi les modèles étudiés, seul ce modèle se focalise sur l'information sur l'espace en phase de programmation architecturale. Il étudie spécifiquement les exigences spatiales quantitatives d'occupation.** Dans l'explication de son modèle, Kim précise qu'une exigence peut être non quantifiable, comme la position demandée pour un espace (ex. étage, zones) et les espaces qui doivent être à sa proximité. Néanmoins, **son modèle ne comporte pas une classification ou une énumération possible de ces types d'exigences.**

Les spécifications du modèle IFC prennent en compte aussi bien les exigences spatiales de programmation que les données sur l'espace en phase de conception. Ce modèle est basé essentiellement sur des données quantitatives dans lesquelles **les exigences spatiales d'ordre qualitatif représentent uniquement 30% des exigences prises en compte.** L'absence d'une énumération de ces exigences rend leur contrôle difficile à envisager. **Ce modèle inclut une partie des descriptions des ESQ_L identifiées dans nos diagrammes de répartition des ESQ_L (chapitre 3). Ces descriptions concernent deux exigences d'accessibilité** (figure 45-a) à savoir : l'accès de type public (vrai/ faux) et la contrainte d'accès mentionnant l'utilisateur de type handicapé (vrai/ faux) (ex. w.c. handicapés) **et trois exigences de confort** (figure 45-b), à savoir : l'éclairage de type artificiel (vrai/ faux), la ventilation de type naturel (vrai/ faux) et l'exigence si l'espace doit être chauffé (vrai/ faux) ou climatisé (vrai/ faux). **Cependant, le modèle IFC ne prend en compte aucune ESQ_L de topologie** (figure 45-c).

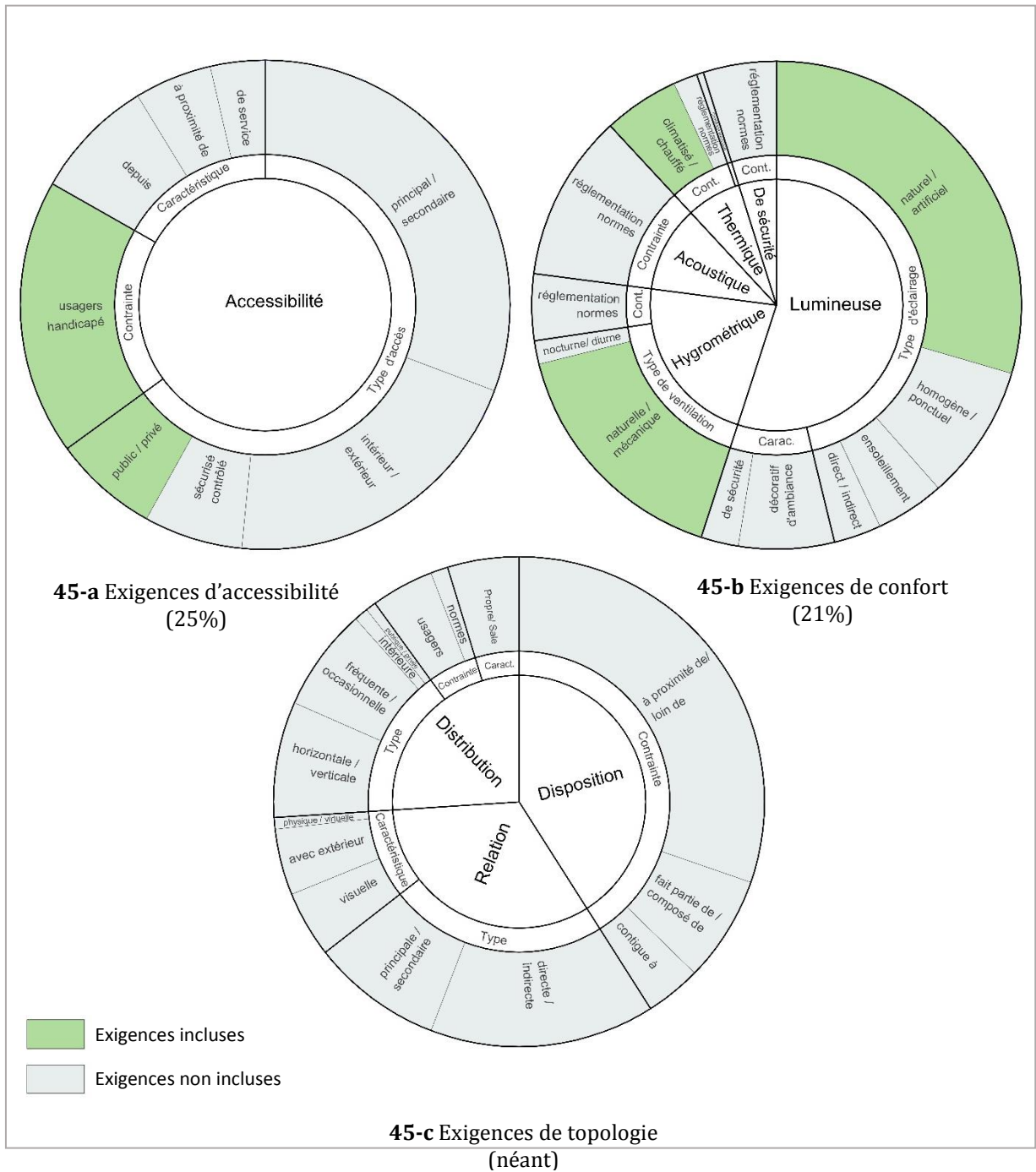


Figure 45 Les exigences spatiales qualitatives (ESQL) prises ou pas prises en compte par le modèle IFC (IFC 4 Add2).

5.4 Bilan

Dans ce chapitre, différents modèles d'espace existants ont été étudiés afin d'analyser leur capacité à prendre en compte et à structurer l'information sur l'espace architectural en phase de programmation architecturale et plus particulièrement sur les ESQ_L identifiées dans le chapitre 3.

Ce travail d'analyse a permis de constater que la plupart des modèles existants se concentrent sur la modélisation des informations concernant l'espace architectural en phase de conception. Les modèles d'Ekholm (Ekholm, 2000) et de Kim (Kim, 2015) incluent une description des exigences spatiales, mais que celles d'ordre quantitatif. **Parmi les modèles analysés, celui des IFC se présente comme le modèle le plus complet.** Il couvre l'information sur l'espace architectural tout au long du cycle de vie du bâtiment et **propose une structuration des exigences spatiales en plusieurs types. Ce modèle se concentre sur les exigences quantitatives et inclue certaines descriptions qualitatives. Ces descriptions ne représentent que 13% des ESQ_L identifiées dans cette étude, avec 25% des exigences d'accessibilité, 21% des exigences de confort et aucune exigence de topologie (figure 45).**

Il est toutefois à noter que les exigences qualitatives incluses dans le modèle IFC correspondent à des ESQ_L que nous avons identifiées comme pertinentes à prendre en compte, car elles sont fréquemment utilisées dans les documents de programmation architecturale analysés (ex. éclairage de type naturel (vrai faux), ventilation de type artificiel (vrai/ faux) et de contrainte d'usager handicapé d'accès (vrai/ faux). Ceci témoigne de la stabilité de nos diagrammes de répartition des ESQ_L (chapitre 3).

La mise à jour de notre travail d'analyse antérieur⁷⁰ du modèle IFC a permis de constater que les exigences spatiales spécifiées n'ont pas évolué depuis la version 2x4 RC3 (2011). Les ESQ_L identifiées au niveau de ce travail de recherche peuvent ainsi représenter la base d'une proposition d'intégration au modèle IFC, ou encore d'un nouveau modèle d'espace portant sur la phase de programmation architecturale et qui présente une structuration et une énumération des ESQ_L. Ce modèle peut constituer la base d'une nouvelle approche de

⁷⁰ Mémoire de master de recherche en sciences de l'architecture, intitulée : *Pertinence de la notion d'espace architectural dans le processus de la conception coopérative. Vers des pratiques coopératives orientées « espaces ».*

conception qui permet de prendre en compte les ESQ_L tout au long de la phase de conception permettant ainsi de mettre en place des pratiques collaboratives orientées '*espace*'.

TROISIÈME PARTIE :

PROPOSITION D'UNE NOUVELLE APPROCHE DE CONCEPTION PRENANT COMPTE DES ESQ_L

Cette troisième partie représente l'apport principal de ce travail de recherche. Elle consiste en la proposition d'une nouvelle approche de conception permettant d'intégrer les ESQ_L à l'outil BIM pour pouvoir ensuite vérifier la conformité des modèles BIM conçus tout au long de la phase de conception. Cette partie porte tout d'abord sur la proposition d'un nouveau modèle d'espace qui inclut et structure l'information sur les ESQ_L, identifiée dans le chapitre 3. Une étape de spécification qui s'avère indispensable avant de passer au développement d'une nouvelle approche de conception qui met en œuvre ce modèle pour assurer la prise en compte des ESQ_L dans l'un des outils BIM actuels. L'intégration des ESQ_L au sein de l'outil BIM rend possible d'imaginer des processus d'aide à la conception qui assistent le concepteur à gérer et à respecter ces exigences.

CHAPITRE 6 :

SPECIFICATION D'UN MODELE D'ESPACE STRUCTURANT LES ESQ_L

Le présent chapitre propose un nouveau modèle de données qui structure toute l'information sur l'espace architectural en prenant en considération les observations issues du travail d'analyse des différents modèles d'espace existants. Ce modèle représente notre vision sur la manière dont les données sur les espaces et les exigences de programmation peuvent être intégrées dans un même schéma et comment elles peuvent être reliées à l'espace architectural. La spécification de ce modèle a évolué au fur et à mesure de l'avancement de ce travail de recherche (Siala A. & Bouattour M., 2014) (Siala & al. 1, 2016)(Siala & al. 2, 2016) (Siala & al. 1, 2017) (Siala & al. 2, 2017). Elle est schématisée en langage graphique EXPRESS-G, à l'aide de l'application Draw.io⁷¹. Notre dernière version de modèle d'espace prend en compte les dernières spécifications du modèle IFC (IFC 4 Add2), étant le modèle d'échange de données le plus utilisé actuellement dans le domaine du bâtiment. Ce modèle représente ainsi la proposition d'une éventuelle évolution ou extension possible du modèle IFC. Pour mettre en évidence nos spécifications par rapport à celles des IFC, nous avons représenté les nouvelles entités en bleu, tout en gardant la couleur jaune des entités IFC.

⁷¹ <https://www.draw.io>

6.1 Vers un modèle d'espace riche en exigences qualitatives

Le concept d'espace architectural tel qu'il est appliqué dans les systèmes d'informations de modélisation d'objets de bâtiments existants est incomplet. En plus de l'absence d'une définition explicite commune de ce concept, il n'existe jusqu'à aujourd'hui aucun modèle d'espace qui couvre toute l'information sur l'espace architectural tout au long de son cycle de vie commençant par les informations de la phase de programmation. Partant de nos analyses des études antérieures sur le concept d'espace, nous proposons une nouvelle définition de ce concept dans le contexte de la modélisation d'objets de bâtiment qui prend en compte les exigences spatiales qualitatives (ESQL) relatives à la phase de programmation. Ce travail de spécification prend en compte les dernières spécifications du modèle IFC, qui constitue l'un des standards d'échange de données les plus utilisées dans les pratiques BIM actuelles et inclue les exigences identifiées dans nos diagrammes de répartition des ESQL (chapitre 3). Notre modèle d'espace représente ainsi une proposition d'enrichissement ou d'évolution possible du modèle IFC. Nous présentons dans ce qui suit les concepts de base de notre modélisation conceptuelle des espaces et nous montrons comment les exigences spatiales peuvent être reliées aux espaces.

6.1.1 Les espaces

Un bâtiment est construit pour fournir un ensemble d'espaces intérieurs et extérieurs bien déterminés. Il est conçu sur la base d'un programme précis décrivant les exigences sur chaque type d'espace, selon les activités qui vont y être logées. Pour décrire la hiérarchie de décomposition de la structure spatiale d'un bâtiment, nous nous alignons avec les spécifications du modèle IFC qui en définit trois à savoir : un groupement d'espaces *<Complex>* (ex. un appartement, une zone ou un étage), un espace *<Space>* (ex. un séjour) et un espace partiel *<Partial>* (ex. un coin de jeux dans un séjour). Conformément au modèle IFC, notre entité *<Space>* peut désigner également un espace intérieur aussi bien qu'un espace extérieur, à travers le type énuméré *<InteriorOrExterior Enum>* (figure 46).

Un espace dispose d'un ensemble de propriétés décrivant son identité, sa géométrie (ou sa forme) et sa position. Ces propriétés sont prises en compte par la plupart des modèles d'espace existants, notamment par le modèle IFC qui sépare les données de forme (volume) et celles de quantité (surface, hauteur sous plafond, périmètre, etc.). En continuité avec ces

modèles, notre entité *<Space>* possède *<Has>* un ensemble de types de propriétés *<PropertyType>* classés comme suit :

- les propriétés d'identité *<Identity>* (ex. nom, identifiant),
- les propriétés de géométrie *<Geometry>* qui regroupent les données de forme *<IfcShapeRepresentation>*, de surface *<IfcAreaMeasure>*, de dimensions *<IfcLengthMeasure>* etc.,
- les propriétés de position *<IfcLocalPlacement>*.

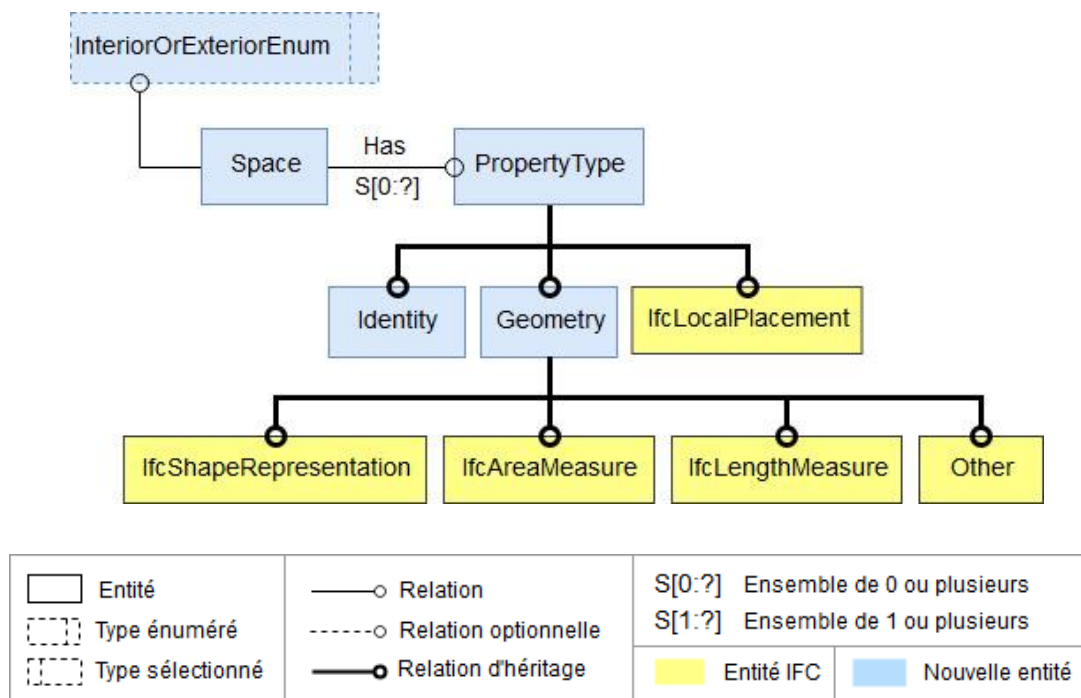


Figure 46 Types de propriétés de l'espace

a- Les types d'espaces et les activités des usagers

Un espace architectural *<Space>* appartient à *<BelongsTo>* un ou plusieurs types d'espace *<SpaceType>*. Un *<SpaceType>* peut avoir des sous-types d'espace *<HasSubType>* (figure 47). Par exemple, le bureau du directeur d'une administration *<Space>* appartient au *<SpaceType>* « bureau » et au sous-type « bureau de direction ».

D'un autre côté, un espace architectural *<Space>* permet *<Allows>* le déroulement d'un ou de plusieurs types d'activités *<ActivityType>*. Par exemple, une cuisine *<Space>* permet de « cuisiner » *<ActivityType>* et éventuellement de « manger » *<ActivityType>*. Un *<ActivityType>* peut avoir *<Has>* plusieurs sous-types *<HasSubType>*. Par exemple le type d'activité

« cuisiner » peut avoir comme sous-types les *<ActivityType>* « découper des légumes », « laver des ustensiles », « utiliser un four », « utiliser une plaque chauffante », etc.

Un *<SpaceType>* suggère *<Suggest>* le déroulement d'un ou de plusieurs *<ActivityType>*. Reprenons l'exemple du bureau du directeur *<Space>*, le *<SpaceType>* « bureau » suggère l'*<ActivityType>* « travailler » qui peut avoir comme sous-type les *<ActivityType>* « lire », « signer un document », « utiliser un ordinateur », etc. Le sous-type « bureau de direction » peut suggérer à son tour d'autres types d'activités, comme « recevoir des invités », « faire une réunion », etc.

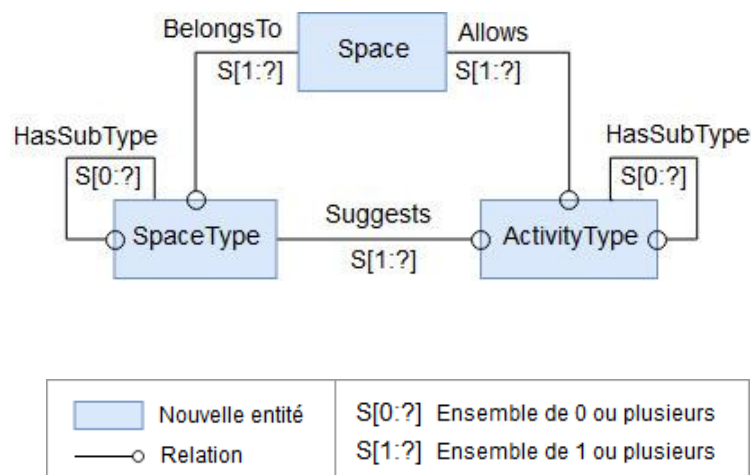


Figure 47 Relations entre les espaces, les types d'espaces et les types d'activités.

b- Les exigences spatiales

L'espace architectural répond à différents types d'exigences *<RequirementType>* déterminés en phase de programmation architecturale. Ces *<RequirementType>* peuvent être attribuées à l'espace à travers son type d'espace *<SpaceType>* ou à travers le type d'activité *<ActivityType>* qui va se dérouler à l'intérieur (figure 48), dans la mesure où, un *<ActivityType>* peut demander *<Demands>* un ensemble de types d'exigences *<RequirementType>* favorisant son déroulement dans l'espace *<Space>* et le déroulement de ses éventuels sous-types d'activités. Par exemple, une cuisine *<Space>* permet habituellement de « cuisiner » *<ActivityType>*. Cet *<ActivityType>* peut demander les *<RequirementType>* ; « table de travail pour le découpage des légumes », « évier », « plaque chauffante », « proximité de la salle à manger », etc. De la même manière, chaque *<SpaceType>* peut demander un ensemble de

<RequirementType>. Par exemple, un bureau de directeur <Space> peut avoir à la fois le <RequirementType> « éclairage naturel » demandé par le type d'espace auquel il appartient « bureau » <SpaceType>, mais aussi le <RequirementType> « accessible du bureau de secrétaire » demandé par son sous-type « bureau de direction ». Finalement, le bureau du directeur <Space> doit satisfaire les deux exigences imposées par son type et par son sous-type d'espace. Il doit bénéficier ainsi d'un éclairage naturel, tout en étant accessible à partir d'un « bureau de secrétaire » <SpaceType>.

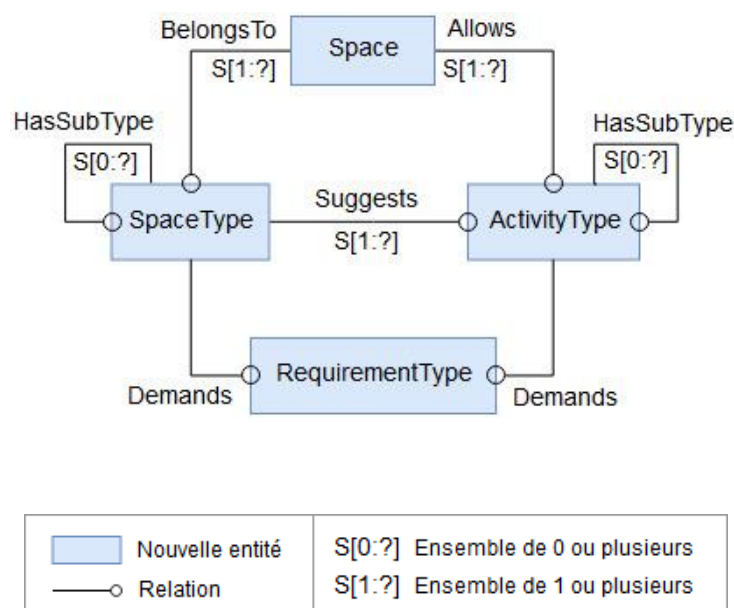


Figure 48 Relations entre les espaces et les exigences spatiales

Nous nous focalisons au niveau de cette partie sur la modélisation des données des ESQ_L auxquelles s'intéresse ce travail de recherche et nous essayons de les représenter en mettant en évidence les nouvelles entités proposées (représentées en bleu) par rapport à celles prises en compte par le modèle IFC (représentées en jaune). Notre modèle des exigences (figure 49) prend en compte les exigences qualitatives aussi bien que celles quantitatives, à travers le type énuméré <QuantitativeOrQualitativeEnum> de l'entité <RequirementType>. Suivant les types d'exigences spatiales identifiés dans notre travail d'analyse de contenu de documents de programmation architecturale (chapitre 3), les <RequirementType> sont structurés en six sous-classes, à savoir :

- les exigences d'occupation <Pset_SpaceOccupancyRequirements> (ex. usagers, nombre d'occupants),

- les exigences de revêtement <Pset_SpaceCoveringRequirements> (ex. type du revêtement du sol),
- les exigences de géométrie <Geometry> qui regroupent les exigences de surface <IfcAreaMeasure>, de dimensions <IfcLengthMeasure>, etc.,
- **les exigences d'accessibilité** <Accessibility>,
- **les exigences de topologie** <Topology>,
- **les exigences de confort** <Comfort>.

Suivant notre diagramme de répartition des exigences d'accessibilité (figure 7), notre modèle spécifie deux types énumérés **d'exigences d'accessibilité**, à savoir : <AccessTypeEnum> et <UserTypeEnum> (tableau 11). Le premier type énuméré est relié à l'entité <SpaceType> à travers une relation optionnelle. Cette relation sert à mentionner le <SpaceType> en question quand il s'agit des constantes <From> (accès à partir de quel type d'espace) et <Next to> (accès à proximité de quel type d'espace). **Parmi nos énumérations des types d'accès et des types d'utilisateurs, le modèle IFC prend en compte uniquement l'exigence d'accès public <Public> et celle du type d'utilisateurs <Disabled>** (annexe 4).

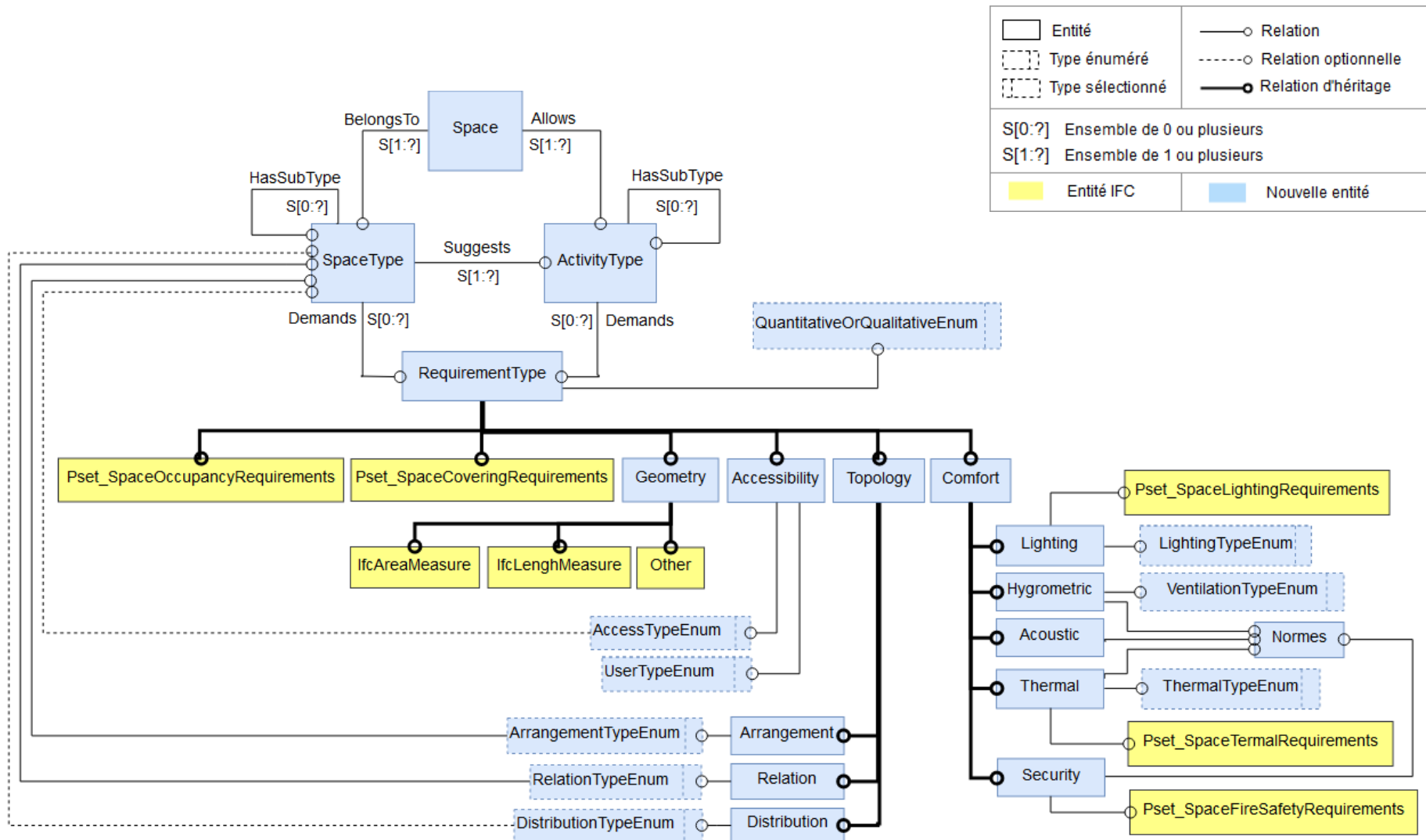


Figure 49 Extrait de notre modèle des exigences

<i><Accessibility></i>	<i>Constante</i>	<i>Description</i>	<i>Relation</i>
<i>Type énuméré</i>			
<i><AccessTypeEnum></i>	Main	Accès principal	
	Secondary	Accès secondaire	
	Interior	Accès intérieur	
	Extérieur	Accès extérieur	
	From	Accès à partir de	<i><SpaceType></i>
	Secured	Accès sécurisé	
	Controlled	Accès contrôlé	
	NextTo	Accès à proximité de	<i><SpaceType></i>
	Public*	Accès public	
	Private	Accès privé	
	Other	Autre type d'accès	
<i><UserTypeEnum></i>	Disabled*	Personnes à mobilité réduite	
	firefighters	Pompiers	
	Pedestrian	Piétonniers	
	Vehicle	Véhicules	
	Other	Autres types d'utilisateurs	

Tableau 11 Définition des énumérations des exigences d'accessibilité
(* constante prise en compte par le modèle IFC)

Les exigences de topologie sont réparties en trois catégories selon notre diagramme de répartition des exigences de topologie (figure 8). Nous définissons ainsi trois sous-classes d'exigences de topologie, à savoir : les exigences de disposition des espaces *<Arrangement>*, les exigences de relation entre ceux-ci *<Relation>* et enfin les exigences de distribution *<Distribution>*. Pour chaque sous-classe, un ensemble de types d'exigences est énuméré définissant les constantes relatives de topologie (tableau 12). Nous définissons ainsi trois types énumérés d'exigences de topologie, à savoir : *<ArrangementTypeEnum>* pour les exigences d'*<Arrangement>*, *<RelationTypeEnum>* pour les exigences de relation et *<DistributionTypeEnum>* pour les exigences de distribution. Les types énumérés *<ArrangementTypeEnum>* et *<RelationTypeEnum>* font toujours référence à un espace en relation *<Space>*. Par exemple, la constante *<NextTo>* de l'*<ArrangementTypeEnum>* décrit la proximité d'un espace par rapport à un autre. Pour cela, ces deux types énumérés sont toujours reliés à l'entité *<Space>*. Par contre, le type énuméré *<DistributionTypeEnum>* peut décrire le type de distribution à fournir à un espace donné sans pour autant préciser l'espace à travers lequel doit se faire la distribution (ex. pour la conception d'un hôpital, une distribution « propre » des salles de soins et des blocs opératoires est souvent exigée). Ainsi, dans notre modèle, le type énuméré *<DistributionTypeEnum>* est relié à l'entité *<SpaceType>* à travers une relation optionnelle qui permet d'indiquer le type de distribution requis et l'éventuel type d'espace à travers lequel doit se faire la distribution. **Il est à noter que le modèle IFC ne prend en compte, jusqu'à présent, aucune constante de ces trois types d'exigences de topologie que nous avons énumérés.**

<Topology>				
<i>Sous-classe</i>	<i>Type énuméré</i>	<i>Constante</i>	<i>Description</i>	<i>Relation</i>
<Arrangement>	<ArrangementType Enum>	NextTo	A proximité de	<SpaceType>
		FarFrom	Loin de	<SpaceType>
		PartOf	Appartient à	<SpaceType>
		ConsistsOf	Composé de	<SpaceType>
		ContiguousTo	Contiguë à	<SpaceType>
<Relation>	<RelationType Enum>	Direct	En relation directe avec	<SpaceType>
		Indirect	En relation indirecte avec	<SpaceType>
		Main	En relation principale avec	<SpaceType>
		Visual	En relation visuelle avec	<SpaceType>
		Physical	En relation physique avec	<SpaceType>
<Distribution>	<DistributionType Enum>	Horizontal	Distribué horizontalement à partir de	<SpaceType>
		Vertical	Distribué verticalement à partir de	<SpaceType>
		Frequent	Distribution fréquente à partir de	<SpaceType>
		Occasional	Distribution occasionnelle à partir de	<SpaceType>
		Interior	Distribution intérieure à partir de	<SpaceType>
		Public	Distribution publique à partir de	<SpaceType>
		Private	Distribution privée à partir de	<SpaceType>
		Clean	Distribution propre	
		Dirty	Distribution sale	
		Users	Les usagers	
Standards	Les normes de distribution			
Other	Autre type de distribution			

Tableau 12 Définition des énumérations des exigences de topologie (dont aucune constante n'est prise en compte par le modèle IFC)

Quant aux exigences de confort, elles sont réparties à leur tour en cinq catégories selon notre diagramme de répartition des exigences de confort (figure 9). Cinq sous-classes sont ainsi définies, à savoir : les exigences lumineuses <Lighting>, hygrométriques <Hygrometric>, acoustiques <Acoustic>, thermiques <Thermal> et enfin de sécurité <Security>.

Nous avons vu dans le chapitre 5 que le modèle IFC définit différentes énumérations d'exigences spatiales de confort (ou encore des ensembles de propriétés d'exigences « PropertySet ») qui incluent certaines constantes qualitatives (ex. type d'occupation d'un espace, type de revêtement) (annexe 4). Notre modèle prend en compte ces types énumérés d'exigences, à savoir les entités IFC qui énumèrent les exigences lumineuses <Pset_SpaceLighting Requirements>, les exigences thermiques <Pset_SpaceThermal Requirements> et de sécurité incendie <Pset_SpaceFireSafetyRequirements> et en spécifie en plus trois autres types énumérés d'exigences de confort, à savoir : <LightingTypeEnum>,

<VentilationTypeEnum> et <ThermalType Enum> (tableau 13). Parmi les constantes spécifiées par ces types énumérés, le modèle IFC prend en compte uniquement le type d'éclairage <Artificial> (vrai/faux), le type de ventilation <Natural> (vrai/faux) et le type de traitement thermique <AirConditioned> (vrai/faux). Conformément à notre diagramme de répartition des exigences de confort, les exigences hygrométriques, acoustiques, thermiques et de sécurité sont régies par des normes et réglementations qui définissent les contraintes sur les espaces selon le pays. Ainsi, dans notre modèle, les entités <Hygrometric>, <Acoustic>, <Thermal> et <Security> sont reliées à l'entité <Normes> qui représente l'agrégation des normes et des réglementations pouvant régir ces types d'exigences par pays.

<Comfort>			
Sous-classe	Type énuméré	Constante	Description
<Lighting>	<LightingTypeEnum>	Natural	Eclairage naturel
		Artificial*	Eclairage artificiel
		Homogeneous	Eclairage homogène
		Punctual	Eclairage ponctuel
		Decorative	Eclairage décoratif
		Daylight	Ensoleillement
		Direct	Eclairage direct
		Indirect	Eclairage indirect
		Security	Eclairage de sécurité
		Other	Autre type d'éclairage
<Hygrometric>	<VentilationTypeEnum>	Natural*	Ventilation naturelle
		Mechanical	Ventilation mécanique
		DayTime	Ventilation diurne
		NightTime	Ventilation nocturne
		Other	Autre type de ventilation
<Thermal>	<ThermalTypeEnum>	Heated	Chauffé
		AirConditioned*	Climatisé

Tableau 13 Définition des énumérations des exigences de confort
(* constante prise en compte par le modèle IFC)

6.1.2 Les objets, les ouvrages et la relation de limite spatiale

Dans notre modèle, nous modélisons le concept d'espace à partir de l'entité mère <Object> qui représente l'entité de plus haut niveau dans la hiérarchie de spécialisation des entités de bâtiment (figure 50). Cette entité peut être définie comme la généralisation de tout ce qui est concevable dans un processus de construction, incluant les ouvrages physiques (ex. les murs, les poteaux, les poutres, etc.) et les espaces (ex. les pièces, les zones, les niveaux, etc.). Cette entité comporte ainsi deux entités sous-classes, la classe des espaces <Space> et celle des ouvrages à laquelle nous nous référons par l'entité IFC <IfcElement>. Les espaces sont reliés aux ouvrages à travers l'entité de relation spatiale <IfcRelSpaceBoundary>. Cette relation est

définie par un ensemble de limites spatiales fournies physiquement ou virtuellement par les ouvrages entourant l'espace. Une limite virtuelle fait toujours référence à un ouvrage ou un équipement bien déterminé (une différence de niveau, une retombée de poutre, du mobilier, etc.).

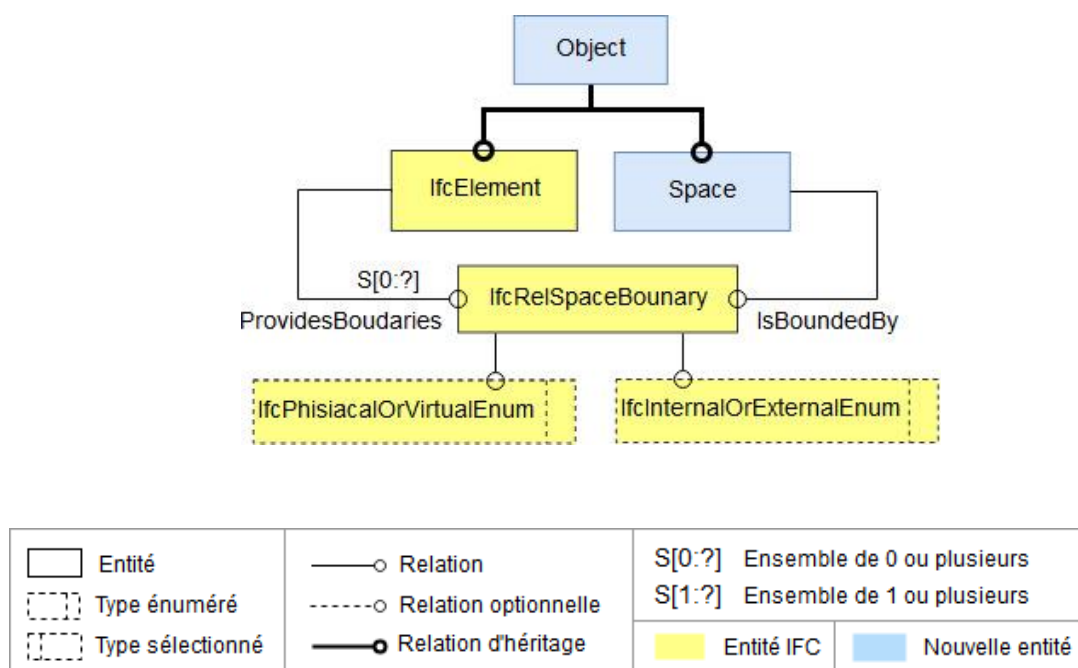


Figure 50 Extrait du schéma de modélisation des objets, des ouvrages et des limites spatiales

6.1.3 Les percements

Les percements peuvent être définis comme des évidements dans les ouvrages d'un bâtiment qui laissent passer les personnes, la lumière, l'air, les rayons solaires, etc. Pour schématiser les percements, nous nous alignons sur les spécifications du modèle IFC. Ainsi, dans notre modèle, un ouvrage peut avoir des percements *<IfcOpeningElement>* à travers la relation d'évidement *<IfcRelVoidsElement>*. Les percements peuvent être remplis par des composants d'ouverture telle qu'une porte *<IfcDoor>*, une fenêtre *<IfcWindow>*, etc. à travers la relation *<IfcRelFillsElement>*. Ces composants d'ouverture sont des spécialisations des ouvrages du bâtiment *<IfcElement>* (figure 51). Les percements servent à assurer l'accès aux espaces, ils assurent leurs aération naturelle, éclairage naturel, ensoleillement, etc. **Pour représenter les différentes relations fonctionnelles entre les percements et les espaces du bâtiment, nous proposons de relier l'entité *<Space>* à l'entité *<IfcOpeningElement>* à travers les relations suivantes :**

- *<IsAccessibleThrough>* ou accessible à travers, dans le cas d'une porte, d'une porte-fenêtre ou encore d'une ouverture libre,
- *<IsVentilatedBy>* (ou est ventilé par), dans le cas d'un composant d'ouverture ouvrant (fenêtre, porte-fenêtre, mur rideau, etc.),
- *<Is Lit By>* (ou est éclairé par), et
- *<IsSunnyThrough>* (ou est ensoleillé à travers), dans le cas de composants d'ouverture vitrée.

Il est à noter que ces différentes relations ne sont pas prises en compte par la totalité des modèles d'espace analysés, y compris le modèle IFC.

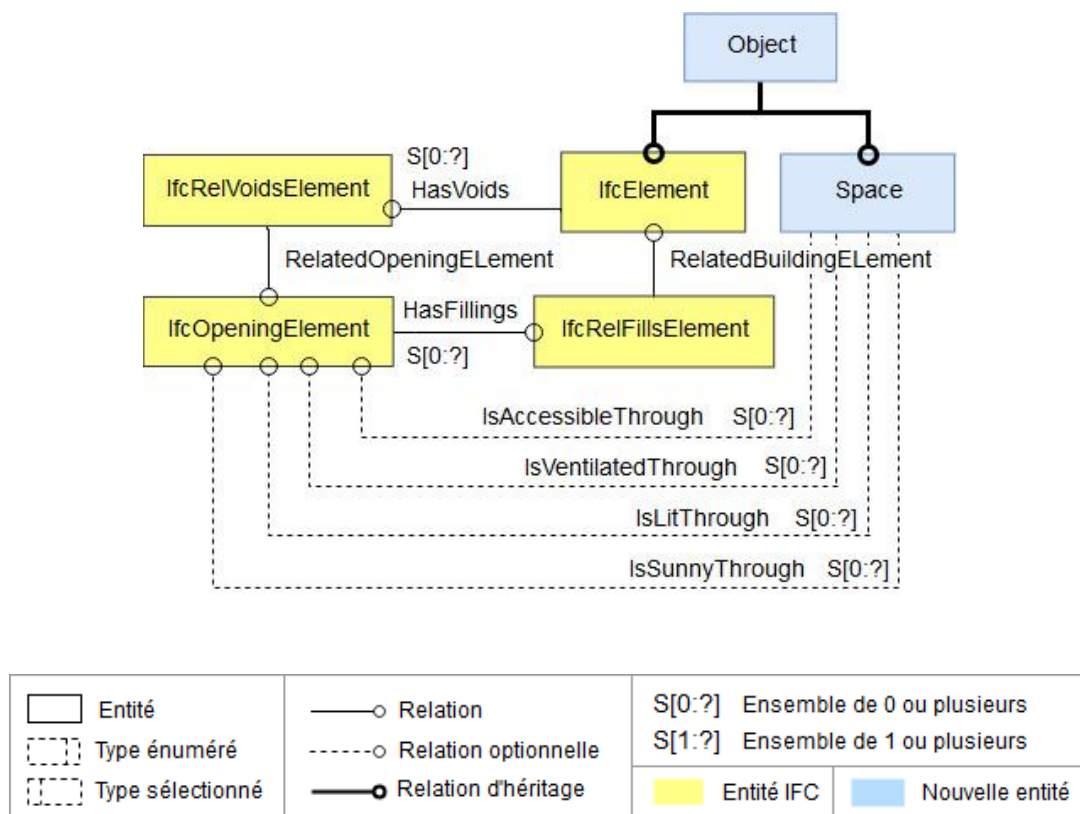


Figure 51 Extrait du schéma de modélisation des percements et de leurs relations avec les espaces

Nous regroupons nos spécifications autour de ce concept dans un même schéma (figure 52). Ce schéma est composé de deux modèles étroitement liés, à savoir :

- Le modèle des espaces *<Space Model>* qui structure les propriétés d'un espace et ses données topologiques en phase de conception,
- Le modèle des exigences *<Requirement Model>* qui structure et énumère les ESQ_L et leurs relations avec l'espace architectural.

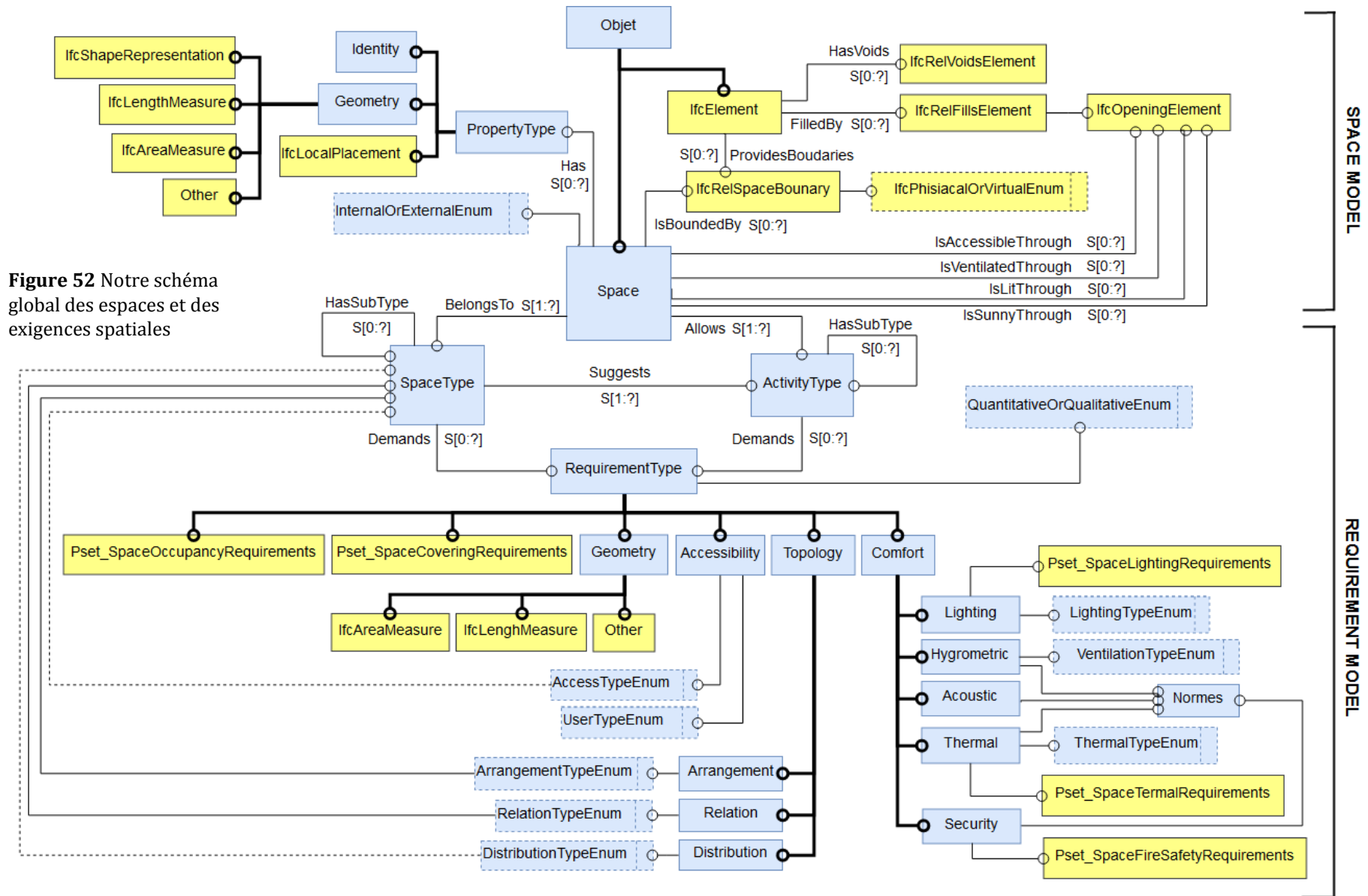


Figure 52 Notre schéma global des espaces et des exigences spatiales

6.2 Évolution du concept d'espace architectural

Ayant conscience de l'importance de la prise en compte de toute l'information sur l'espace architectural tout au long de son cycle de vie dans une même définition. Nous proposons de représenter les différents états par lesquels passe le concept d'espace architectural durant son cycle de vie. Sa représentation finale serait alors l'union des représentations.

6.2.1 Spécialisation par alternative en plusieurs états

Pour le découpage du concept d'espace en plusieurs états, nous nous basons sur le principe de spécialisation par alternative (Halin, 2004) comme outil de modélisation permettant d'identifier les états stables par lesquels passe l'espace architectural au cours de son cycle de vie. Il s'agit d'une forme d'abstraction qui permet d'exprimer le changement de caractéristiques que peut subir une entité durant son cycle de vie. Ceci nous permet de rendre compte que l'entité *<Space>* est *alternativement* une instance de différentes classes, tout en préservant son identité au niveau de notre modèle. Nous distinguons ainsi différents états d'un espace durant le cycle de vie du bâtiment (figure 1), à savoir : l'espace dans la phase de programmation *<SpaceInProgramming>*, l'espace dans la phase de conception *<SpaceInDesign>*, l'espace dans la phase de construction *<SpaceInConstruction>*, l'espace dans la phase d'occupation et de maintenance *<SpaceInOccupation>*, l'espace dans la phase de rénovation *<SpaceInRenovation>*, etc. Nous nous intéressons dans ce travail de modélisation à la formalisation du concept d'espace architectural durant le processus de programmation-conception. Nous nous limitons ainsi à l'identification des données nécessaires à la définition des états du concept d'espace durant ce processus, à savoir durant la phase de programmation et la phase de conception.

Pour pouvoir identifier les données dont dispose l'entité *<Space>* durant chacune de ces phases, nous avons essayé d'identifier les actions que subissent les objets des classes *<SpaceInProgramming>* et *<SpaceInDesign>* dans un diagramme d'état transition (figure 53). Durant la phase de programmation *<SpaceInProgramming>*, le programmiste remplit les exigences sur les espaces *<fulfillRequirements()>*. Il commence par la définition des types d'espaces demandés, puis spécifie pour chaque type d'espace le ou les types d'activités qu'il doit permettre et associe ensuite un ensemble d'exigences aux types d'espace et/ou aux types d'activités créés. Les exigences étant définies *<DefinedRequirements>*, l'espace dispose d'au moins un type d'espace *<SpaceType>* auquel il appartient, un type d'activité *<ActivityType>* qui

va se dérouler à l'intérieur et un type d'exigence *<RequirementType>* (tableau 14). Il passe ainsi à la phase de conception *<SpaceInDesign>*, durant laquelle il est mis en forme par l'architecte. Durant cet état, l'espace passe dans un processus répétitif de représentation *<represent()>* et de vérification *<check()>* jusqu'à validation des exigences *<ValidatedRequirements>*.

En concevant, l'architecte donne à l'espace une position, des propriétés géométriques et des données topologiques. Il peut également lui associer un ensemble d'annotations (ex. cotations, nomenclature). Étant conçu l'espace dispose ainsi, en plus des informations qui lui sont associées durant la phase de programmation, d'une position, d'un ensemble de propriétés géométriques, d'un ensemble de données de topologie et d'un ensemble d'annotations.

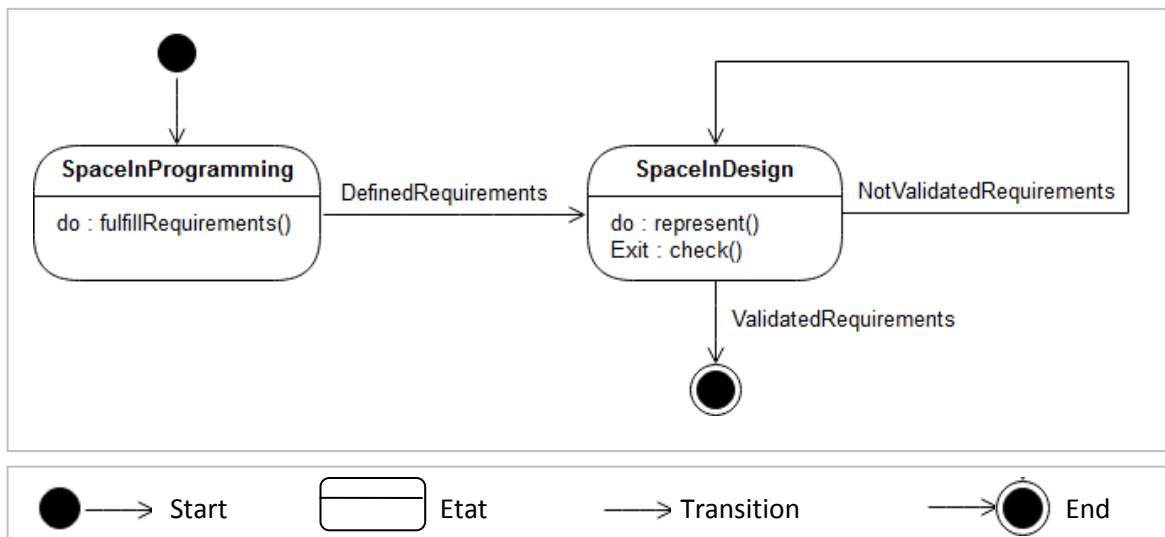


Figure 53 Diagramme d'états transitions (UML) du concept d'espace architectural durant les phases de programmation et de conception.

État	Space Type	Activity Type	Requirement Type	Position	Geometry	Topology	Annotation
<i><SpaceInProgramming></i>	1*	1*	1*	null	null	null	null
<i><SpaceInDesign></i>	1*	1*	1*	1	1	1	1*

Tableau 14 Définition des états d'espace par valeur de propriété/donnée (* : ou plusieurs)

6.2.2 Définition des états d'espace par valeurs de données

En nous basant sur nos spécifications des entités de base de notre modèle d'espace et sur la spécialisation par alternative du concept d'espace architectural en plusieurs états, nous proposons dans ce qui suit des définitions par valeur de propriétés des états d'espace *<SpaceInProgramming>* et *<SpaceInDesign>*.

Durant la phase de programmation, l'espace architectural dans l'état *<SpaceInProgramming>* peut être défini comme une surface ou un volume déterminé par un ensemble d'exigences spatiales quantitatives ou qualitatives destiné à permettre le déroulement d'un certain nombre d'activités.

Durant la phase de conception, l'espace architectural *<SpaceInDesign>* peut être défini comme une surface ou un volume délimité matériellement ou virtuellement pour permettre le déroulement d'un certain nombre d'activités. Il est conçu sur la base d'un ensemble d'exigences quantitatives ou qualitatives.

Ces deux états d'espace possèdent bien évidemment des différences qui caractérisent l'un par rapport à l'autre. Le *<SpaceInProgramming>* ne possède pas à priori de forme. Il est toutefois défini par un certain nombre d'exigences *<RequirementType>* qui peuvent être d'occupation *<Pset_SpaceOccupancyRequirements>*, de revêtement *<Pset_SpaceCovering Requirements>*, de géométrie *<Geometry>* (ex. surface prévue, volume ou hauteur sous plafond souhaité), d'accessibilité *<Accessibility>*, de topologie *<Topology>* ou de confort *<Comfort>*. En passant à la phase de conception, l'espace passe à l'état de *<SpaceInDesign>*. En plus de toutes les exigences qui lui sont attribuées dans son état initial, il peut désormais avoir une forme et posséder par conséquent une identité *<Identity>*, des propriétés géométriques *<Geometry>* (ex. surface, volume) et une position *<IfcLocalPlacement>*.

6.3 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons présenté la spécification d'un nouveau modèle d'espace qui prend en compte et structure les ESQ_L. Ce travail de modélisation représente l'élément clé de ce travail de recherche dans lequel nous avons procédé à une synthèse et prise en compte des observations issues de l'état de l'art sur les limites des outils BIM actuels, mais aussi sur les limites des modèles d'espaces existants à supporter l'information qualitative décrivant les exigences spatiales. Le travail d'analyse de contenu de documents de programmation architecturale effectué au niveau du troisième chapitre nous a permis de résoudre la problématique de la prise en compte, de la structuration et de l'énumération des ESQ_L.

Le modèle que nous avons proposé est dédié au processus de programmation-conception. Les définitions que nous avons formulées du concept d'espace et de ses états constituent une ébauche de définition qui peut être complétée dans des travaux futurs par la définition des différents états par lesquels passe un espace tout au long de son cycle de vie. Ce travail de modélisation s'inscrit dans une vision qui repose sur une meilleure prise en compte des ESQ_L de la phase de programmation dans les pratiques BIM actuelles afin de pouvoir assister l'évolution de la conception, de façon à aboutir à des modèles BIM qui respectent mieux le programme demandé. Nos spécifications autour du concept d'espace architectural et de ses exigences constituent la base d'un travail de développement qui a pour but l'intégration des ESQ_L identifiées au sein de l'un des outils BIM actuels. L'intégration de ces types d'exigences dans une démarche BIM vise à proposer une nouvelle approche de conception permettant d'assister le concepteur à consulter et à gérer les ESQ_L, mais également à vérifier automatiquement la conformité de son modèle de conception à ces exigences tout au long du processus de conception.

CHAPITRE 7 :

PROPOSITION D'UN PROTOTYPE BASE SUR LE MODELE D'ESPACE PERMETTANT LA PRISE EN COMPTE ET LA VERIFICATION DES ESQ_L

Pour pouvoir évaluer le modèle spécifié dans le précédent chapitre, nous nous orientons dans ce qui suit vers le développement d'un prototype, basé sur ce modèle, qui permet aux concepteurs d'intégrer les ESQ_L du programme dans l'outil BIM et de vérifier ensuite, d'une manière automatique, la conformité des modèles BIM conçus aux exigences intégrées. Nous passons par la suite à la présentation du travail d'expérimentation et aux retours sur expériences pour pouvoir évaluer enfin le prototype développé et le modèle d'espace sur lequel il se base.

Ce chapitre expose d'abord la démarche globale de fonctionnement du prototype développé. Il explique ensuite la méthode et les outils adoptés dans le travail de développement, avant de dévoiler enfin ses différentes étapes. L'objectif principal de ce prototype est de permettre à l'un des outils BIM actuels, couramment utilisés par les acteurs du domaine du bâtiment, notamment les architectes, de prendre en considération les ESQ_L spécifiées par notre modèle d'espace, mais aussi d'ajouter à l'outil BIM de nouvelles fonctionnalités permettant aux concepteurs de gérer et de vérifier ces informations sur les espaces tout au long du processus de conception.

7.1 Méthode de développement et démarche fonctionnelle

7.1.1 Objectifs du prototype

Le prototype a comme objectif principal de permettre aux concepteurs utilisant l'un des outils BIM actuels d'enrichir l'information sur les espaces, et ce par l'ajout des ESQ_L identifiées au niveau du chapitre 3. Il s'agit ainsi de pouvoir prendre en compte et représenter l'ensemble de ces exigences et de leurs valeurs de propriétés (désignées dans ce qui suit par 'paramètres') dans l'interface de l'outil BIM utilisé à un stade précoce du processus de conception architecturale. Il a également comme objet de permettre de vérifier la conformité des modèles BIM aux exigences ainsi intégrées, en mettant en évidence graphiquement les espaces dont les propriétés ne répondent pas aux paramètres d'exigences demandés par le programme. Ceci permet au concepteur de vérifier son travail, au fur et à mesure de l'avancement de la conception et de revoir les lacunes identifiées pour aboutir à un modèle BIM qui respecte au mieux le programme.

7.1.2 Outils adoptés et méthode de développement

a- L'outil BIM concerné

Le prototype doit être dédié à l'un des outils BIM actuels, couramment utilisés en phase de conception architecturale. Il doit se présenter comme une extension des fonctionnalités de base de cet outil. Pour cela, la première étape de ce travail de développement est celle du choix de l'outil BIM dans lequel doit fonctionner ce prototype. Nous devons choisir non seulement un outil évolué en ce qui concerne la conception d'espaces, mais également ouvert à l'intégration de nouvelles fonctionnalités.

À partir du travail d'analyse des outils BIM actuels (chapitre 4), nous avons pu constater que Revit représente l'outil le plus développé en ce qui concerne la conception d'espaces. Il spécifie deux entités pour le concept d'espace, à savoir : <espace> et <pièce>. L'entité <espace> est dédiée aux outils d'ingénierie pour l'analyse des charges de chauffage et de climatisation. Tandis que, l'entité <pièce> concerne l'architecte dans sa conception et dans la répartition des pièces selon l'occupation, la topologie demandée, etc. Cet outil est également ouvert aux développeurs⁷² de plug-ins; soit en milieu de développement interne à travers des macros et

⁷² <http://help.autodesk.com/view/RVT/2017/ENU/?guid=GUID-E0E0FCEB-EB88-4F15-9087-F5374817F758>

des modules accessibles mis à dispositions depuis la plateforme Revit, soit en milieu de développement externe avec un code open source.

Le reste des outils BIM actuels sont en majorité fermés au développement. Toutefois, quelques-uns permettent une certaine ouverture limitée uniquement à leurs partenaires (des sociétés de développement partenaires agréées) comme l'outil ArchiCAD. Ainsi, nous avons opté pour l'utilisation de Revit comme outil support au développement de notre prototype. Conformément à l'appellation des entités dans Revit, **dans ce qui suit le terme 'espace' est remplacé dans ce qui suit par le terme 'pièce'**.

b- Les différentes possibilités de développer avec l'outil Revit

La société Autodesk met à disposition des utilisateurs de Revit plusieurs possibilités de programmation pour créer des plug-ins en vue d'adapter l'outil à leurs besoins spécifiques. Des interfaces de programmation d'applications API associées à des kits de développement logiciel SDK⁷³ permettent aux utilisateurs de Revit de personnaliser les fonctionnalités existantes de l'outil, d'ajouter de nouvelles fonctionnalités et d'automatiser des tâches sans quitter l'environnement de Revit. Cela repose principalement sur le langage de programmation C#⁷⁴ ou l'un des langages compatibles (ex. VB.NET ⁷⁵, F# ⁷⁶). Cependant, ces interfaces de programmation requièrent un haut niveau de connaissance en informatique que n'ont pas la plupart des concepteurs du domaine du bâtiment.

Une deuxième possibilité de développement sur Revit se présente, il s'agit d'un plug-in qui offre aux développeurs une plateforme de programmation visuelle accessible aux concepteurs, notamment aux architectes. Cette plateforme ne requiert pas de connaissance spécifique dans un langage informatique puisqu'elle ne laisse pas la possibilité de commettre des erreurs de syntaxe : le code étant enfermé dans des nœuds dans un graphe. Pour formaliser son code, le programmeur relie entre différents nœuds dans une interface à caractère graphique relativement simple.

⁷³ <http://www.autodesk.com/revit-sdk>.

⁷⁴ <https://docs.microsoft.com/fr-fr/dotnet/csharp/getting-started/introduction-to-the-csharp-language-and-the-net-framework>

⁷⁵ <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/visual-basic/>

⁷⁶ <https://docs.microsoft.com/fr-fr/dotnet/fsharp/>

c- La méthode de programmation visuelle

La conception architecturale implique souvent l'établissement de relations visuelles, systémiques ou géométriques entre ses parties (Wahbeh 2017). Ces relations sont développées par des flux de travail ou des processus qui nous amènent du dessein au dessin, de l'idée de base du concepteur vers le projet ou la partie du projet conçus, en passant par un ensemble d'actions et de règles. Par exemple, pour concevoir un mur rideau, le concepteur doit passer par les étapes suivantes : Définir la position de la baie, ses dimensions (largeur, hauteur), les dimensions du profilé utilisé (largeur, épaisseur) et finalement la division du quadrillage intérieur (nombre de divisions à l'horizontale et à la verticale). Ainsi, sans le savoir, nous travaillons d'une manière algorithmique en définissant un ensemble d'actions qui suivent une logique de base d'entrée, de traitement et de sortie. La méthode de programmation visuelle nous permet de continuer à travailler de cette manière, mais tout en formalisant nos algorithmes. Ces algorithmes constituent ainsi une méthode de conception paramétrique plus rapide, dans le sens où le concepteur n'aura plus qu'à définir les entrées (ou les paramètres) de l'algorithme en question pour visualiser automatiquement le résultat graphiquement.

La programmation visuelle (ou graphique) est un langage de programmation dans lequel les programmes sont écrits par assemblage d'éléments graphiques disposés spatialement (Figure 54). Ces éléments sont représentés généralement sous forme de boîte (ou autres formes graphiques) traitée en tant qu'entité, appelée « nœud ». Ces nœuds renferment des codes ou des fragments de code protégés et possèdent un certain nombre d'entrées et de sorties. La programmation d'un code (ensemble de nœuds) se fait en reliant les entrées et les sorties de ses entités. Son exécution se fait en parcourant le graphe ainsi formé.

La programmation visuelle permet d'étendre la démarche BIM avec les données et l'environnement logique d'un éditeur d'algorithmes graphiques, et d'aborder par conséquent l'architecture computationnelle. Dans l'approche computationnelle, il ne s'agit pas simplement de représenter ou de modéliser le projet architectural, mais de suivre une démarche conceptuelle qui s'appuie principalement sur le calcul informatique (d'où vient le terme Computation). En d'autres termes, c'est une approche où l'architecture est informatiquement « programmée » et mathématiquement modélisée (JP Couwenbergh, 2015), dans laquelle l'architecte n'est pas uniquement celui qui conçoit le modèle BIM, mais aussi celui qui conçoit le code de sa génération.

Plusieurs outils de programmation visuelle sont disponibles actuellement permettant aux concepteurs de générer des formes complexes, de gérer des relations géométriques complexes, d'automatiser des tâches de conception, etc. On note parmi d'autres, Dynamo⁷⁷, Grasshopper⁷⁸ Blender⁷⁹, GenerativeComponents⁸⁰, etc. Ces outils peuvent être utilisés en engageant un processus de programmation visuelle sur un outil CAO ou un outil BIM, comme ils peuvent être utilisés seuls, puisqu'ils permettent de visualiser une vue en 3D du modèle généré.

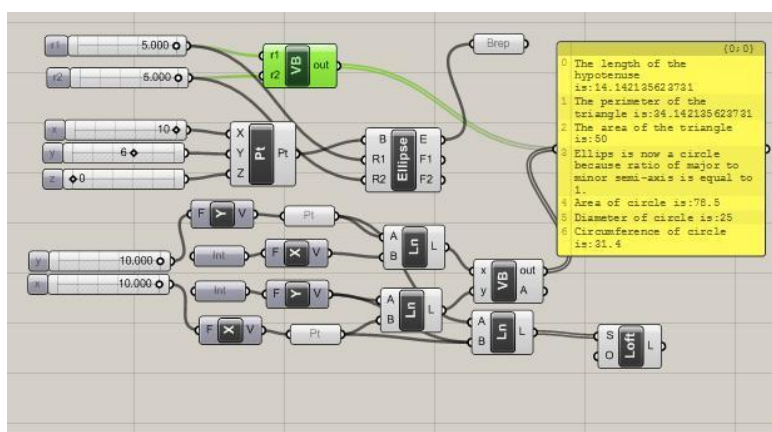


Figure 54 Exemple de code de programmation visuelle sur Grasshopper qui permet de paramétrer les formes d'une ellipse et d'un triangle.

d- L'outil de programmation visuelle choisi

L'outil Revit possède une extension de programmation visuelle appelée « Dynamo » sous la forme d'un plug-in développé spécifiquement pour Autodesk. C'est une plateforme logicielle de modélisation paramétrique accessible à la fois aux programmeurs et aux non-programmeurs. Cet outil permet aux concepteurs utilisant Revit de générer des formes architecturales complexes et de gérer toute l'information sur le bâtiment en ajoutant à la plateforme Revit des extensions contenant de nouvelles fonctionnalités. Cette plateforme permet également de lire/ écrire des données depuis/dans le tableur Microsoft Excel et propose une interface assez simple qui permet la création, la gestion et l'exécution de plusieurs algorithmes (ou scripts) en même temps, à travers le lecteur Dynamo Player⁸¹. Nous adoptons

⁷⁷ <http://dynamobim.org>

⁷⁸ <http://www.grasshopper3d.com>

⁷⁹ <https://www.blender.org>

⁸⁰ <https://www.bentley.com/fr/products/product-line/modeling-and-visualization-software/generativecomponents>

⁸¹ <https://knowledge.autodesk.com/fr/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/FRA/Revit-AddIns/files/GUID-BFCE20D2-86D4-4591-8CF3-5405D26DB825-htm.html>

ainsi au niveau de ce travail de développement l'outil de programmation visuelle Dynamo et son lecteur Dynamo Player.

7.1.3 Définition de la démarche

Nous avons commencé tout d'abord par la définition des utilisateurs du prototype, avant l'identification du rôle de chacun (qui fait quoi ? et quand ?) pour pouvoir déterminer sa démarche fonctionnelle à chaque étape du processus de conception.

a- Définition des acteurs auxquels le prototype est destiné

Ce prototype est dédié aux concepteurs du domaine du bâtiment, spécifiquement aux architectes et aux designers qui interviennent tout au long du processus de conception architecturale. Il intéresse également les acteurs responsables de la programmation architecturale, puisqu'il repose sur des exigences définies en phase de programmation. On distingue ainsi deux types d'utilisateurs du prototype, à savoir :

- *Le programmiste* : ou acteur chargé de la mission de programmation architecturale. Il peut être l'architecte chargé de la conception lui-même, dans le cas de petits projets ou encore un autre acteur (ex. architecte, sociologue, économiste) ou un groupement d'acteurs (ex. bureau d'études de programmation) chargé uniquement de l'étude de programmation du projet, surtout dans le cas de grands projets (ex. ouvrages publics, concours),
- *Le concepteur* : Acteur ou groupement d'acteurs chargé de la mission de conception architecturale (ex. architecte, designer, etc.).

b- Démarche proposée et rôle de chaque acteur

La démarche proposée s'étale principalement sur deux phases, la phase de programmation architecturale et celle de conception (figure 55). Pour la phase de programmation, nous avons préparé un fichier Excel prérempli qui permet au programmiste d'associer les exigences aux pièces en sélectionnant ses choix parmi des listes de valeurs prédéfinies sur la base du modèle d'espace spécifié. Ainsi, le programmiste fournit au concepteur, non seulement une étude de programmation (document papier ou numérique), mais aussi un fichier Excel traduisant et synthétisant les ESQ_L requises sous forme numérique

pouvant être exploitées par le prototype. Ce tableau comporte les ESQ_L spécifiées par notre modèle d'espace (chapitre 6).

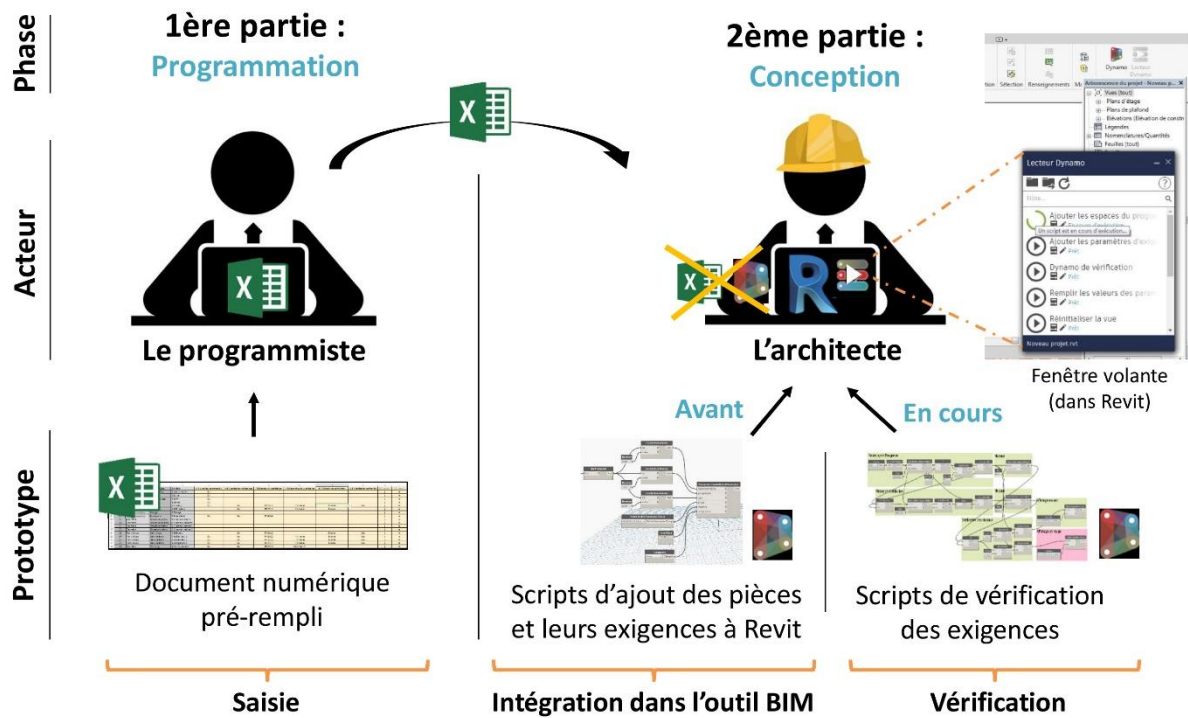


Figure 55 Déroulement de la démarche proposée, prototype et rôle de chaque acteur.

Avant de commencer la conception, le concepteur ayant reçu le fichier Excel de la part du programmeur, ajoute les exigences du programme (en particulier les exigences de topologie, d'accessibilité, de confort) à la plateforme de Revit, à travers l'exécution de trois scripts Dynamo développés à cet effet. En se basant sur la fonction « *Excel.ReadFromFile* » qui assure l'extraction des données du fichier Excel. Ces scripts permettent de :

- ajouter les pièces du programme à la liste des nouvelles pièces de Revit,
- ajouter les noms des paramètres d'exigences à la liste des propriétés des pièces de Revit,
- ajouter finalement les valeurs de ces paramètres par nom et par nombre de pièce.

Il est à noter que, dans notre démarche, le concepteur travaille uniquement sur son outil de conception (Revit). Il n'est pas sensé ni ouvrir le fichier Excel (le tableau des exigences) ni les scripts Dynamo. Il exécute les scripts à travers le lecteur Dynamo Player, à partir d'une fenêtre flottante sur la plateforme Revit. Après avoir ajouté les exigences à Revit, le concepteur passe à la mise en forme du terrain et à la prise en compte des contraintes réglementaires.

Dans notre approche, le concepteur ne commence pas par le dessin des limites des pièces, mais par la manipulation des pièces elles-mêmes, tout en respectant les exigences de proximité, de relation, de distribution, d'éclairage, etc. désormais visibles dans la liste des propriétés de chaque pièce sélectionnée. La démarche consiste ainsi à concevoir au départ un organigramme fonctionnel à l'aide des pièces du programme. Puis, d'ajouter les ouvrages les délimitant (murs, portes, fenêtres, etc.) jusqu'à aboutir à un modèle cohérent. Au fur et à mesure de l'avancement de la conception, le concepteur peut vérifier la conformité de sa conception aux exigences requises. Ceci est assuré à travers des scripts de vérification Dynamo développés sur la base des règles nécessaires à la vérification de chaque paramètre d'exigence.

Nous présentons dans ce qui suit, les différentes étapes de développement du prototype autour de ses trois fonctionnalités principales, à savoir : la saisie des exigences, leur intégration dans l'outil BIM et la vérification de la conformité des modèles BIM en fonction. Nous avons pris comme cas d'application le programme de conception d'une habitation individuelle à Tunis pour une famille de quatre membres.

7.2 Saisie des exigences spatiales qualitatives

Le tableur Microsoft Excel a été choisi comme support à la saisie des exigences, étant compatible avec l'outil de programmation visuelle Dynamo. Ainsi, un tableau Excel a été mis en place pour la saisie des paramètres des exigences du programme. Ce tableau nommé « Tableau des exigences » est classé en dix feuilles représentant chacune une catégorie d'exigence (figure 56). Chaque feuille permet la saisie des différents paramètres et valeurs de paramètres spécifiés par notre modèle d'espace (figure 52). Ce tableau est prérempli, il permet au programmiste de sélectionner rapidement les valeurs de paramètres dont il a besoin.

Nous rappelons que notre modèle d'espace est basé sur un travail d'analyse de contenu de documents de programmation architecturale de différents projets réels qui nous a permis d'identifier les valeurs de paramètres d'exigences les plus fréquemment utilisées pour décrire les pièces en phase de programmation architecturale. Ainsi, la liste des paramètres et des valeurs de paramètres d'exigences présentée dans ce modèle n'est pas exhaustive. Il peut y avoir d'autres paramètres ou valeurs de paramètres qui n'étaient pas présents ou fortement présents dans ces documents. Pour cela, la liste des paramètres de chaque feuille du tableau des exigences est ouverte permettant au programmiste d'en ajouter d'autres (deux colonnes vides sont prévues dans le tableau à cet effet, le programmiste peut également en ajouter

d'autres selon le besoin). Le tableau préparé porte principalement sur les ESQ_L identifiées au niveau de ce travail de recherche, à savoir celles portant sur l'accessibilité, la topologie des pièces, et le confort à l'intérieur.

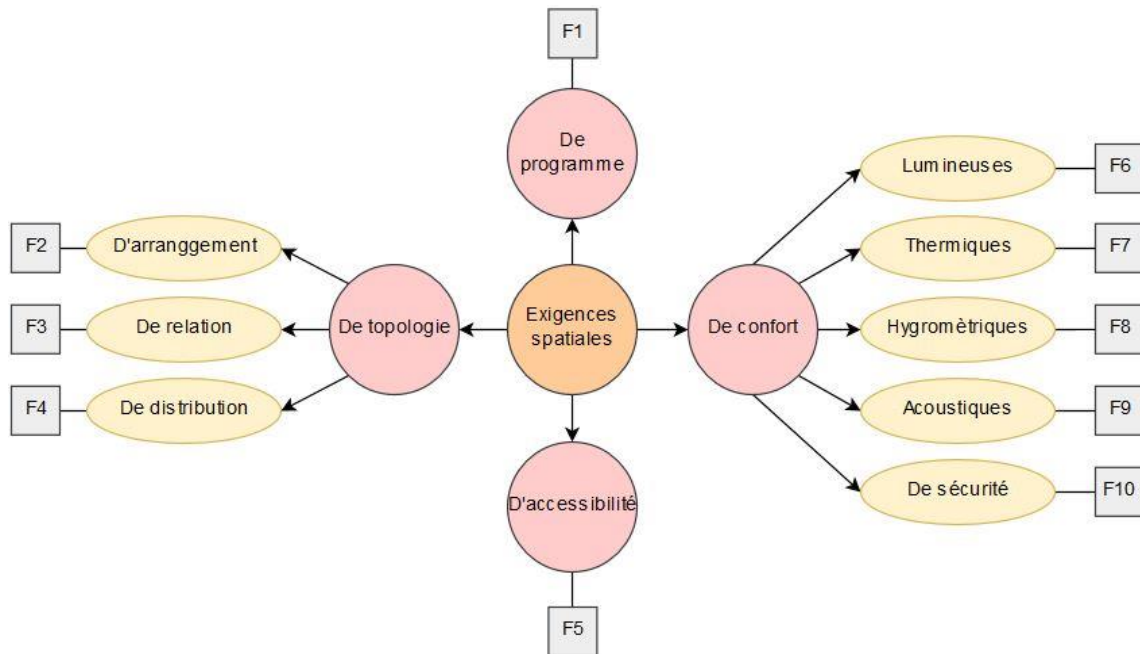


Figure 56 Exigences sur lesquelles se base le prototype avec les numéros des feuilles Excel correspondantes

➤ *Feuille 1 : Exigences du programme (figure 57)*

Conformément à notre modèle des exigences (figure 49), celles-ci sont attribuées à l'espace <Space> soit à travers son type d'espace <SpaceType> et éventuellement son sous-type d'espace, soit à travers le type d'activité <ActivityType> et éventuellement le sous-type d'activité qui va se dérouler à l'intérieur. Nous nous concentrons au niveau de ce travail de développement uniquement sur le premier cheminement. C'est-à-dire l'attribution des exigences à travers le type <Space-Type> et le sous-type d'espace <Sub-Type>. Et ce pour éviter de recevoir, pour une même pièce, deux valeurs de paramètres pouvant être contradictoires nécessitant des mécanismes de résolution de conflits pour la détermination des valeurs les plus restrictives, sachant que nous avons affaire ici à des valeurs d'ordre qualitatif. L'information sur le type d'espace <Space-Type> et le sous-type d'espace <Space-SubType> auxquels appartient une pièce donnée est ainsi indispensable pour pouvoir accéder à l'ensemble de ses exigences. La première feuille du tableau permet la saisie de l'ensemble de ces données sur les pièces.

0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom
1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée
2	Espace de jour	Salon	N Salon
3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM
4	Espace de jour	Séjour	N Séjour
5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine
6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités
7	Espace de service	Garage	N Garage
8	Espace de service	Buanderie	N Buanderie
9	Chambre	Chambre parents	N Chambre parents
10	Chambre	Chambre enfant	N Chambre enfant 1

Figure 57 Tableau des exigences, extrait de la feuille des exigences du programme

7.2.1 Saisie des exigences de topologie

Les exigences de topologie <Topology> sont classées dans le tableau des exigences en trois feuilles, selon le modèle d'espace spécifié, à savoir : celles dédiées à la disposition <Arrangement>, celles pour la prise en compte des relations <Relation> et celles permettant la description de la distribution des pièces <Distribution>. Ces feuilles permettent au programmeur de spécifier les différentes valeurs de paramètres énumérées par notre modèle (tableau 12). Ainsi, dans les feuilles des exigences de topologie, la liste des valeurs de paramètres possibles correspond à la liste des sous-types d'espaces <Space-SubType> du projet. Ceci est fait à travers la fonction de validation des données du tableur Excel (le type de données autorisé est « Liste », et la liste des Sous-Types d'espaces est sélectionnée).

➤ Feuille 2 : Exigences de disposition (ou d'arrangement) (figure 58)

Suivant l'énumération des exigences de disposition proposée par notre modèle (<NextTo>, <FarFrom>, <PartOf>, <ConsistsOf>, <ContiguousTo>), les noms des paramètres de disposition sont classés dans la feuille des exigences de disposition, de la manière suivante :

- À proximité de <NextTo> : représente l'exigence la plus utilisée décrivant l'arrangement des pièces dans les documents de programmation analysés. Dans ce type de description des exigences, plusieurs <Space-SubType> peuvent être désignés. Par exemple, pour la conception d'un immeuble d'habitation, la salle d'eau des invités <Space-SubType> peut avoir l'exigence d'être à la proximité des <Space-SubType> : salle à manger, salon et cuisine à la fois. Pour cela, nous avons prévu dans ce tableau trois colonnes permettant de remplir les valeurs de paramètre de proximité. Le programmeur pourrait également en ajouter d'autres selon le besoin,

- *Loin de <FarFrom>* : ce paramètre représente l'opposé du précédent pour lequel deux colonnes sont prévues servant à remplir les valeurs de paramètres, suivant le même principe de désignation de plusieurs types d'espaces (rarement rencontré dans les documents de programmation architecturale analysés),
- Appartient à <PartOf> et fait partie de <ConsistsOf> : puisque ces exigences d'appartenance sont des exigences opposées, nous avons prévu à cet effet une seule colonne dans la fenêtre des exigences de disposition, à savoir la colonne (Appartient à) <PartOf>. Cette colonne permet au programmeur de désigner l'appartenance du type d'espace concerné à un autre. Ainsi, la saisie des données est simplifiée, car un seul <Space-SubType> contenant est indiqué à la fois. Alors que dans le cas inverse, l'exigence (est composé de) <ConsistsOf> nécessite la saisie de plusieurs valeurs de paramètres,
- Contiguë à <ContiguousTo>: Théoriquement, cette exigence pourrait recevoir également plusieurs valeurs de paramètres. Mais, nous avons remarqué dans notre travail d'analyse de contenu de documents de programmation architecturale (chapitre 3) que, dans la pratique, un seul <Space-SubType> contigu est généralement désigné. Pour cela, une seule colonne est prévue à cet effet dans la fenêtre des exigences de topologie.

Il est à noter que les exigences de topologie décrivant la disposition, la relation ou la distribution entre deux ou plusieurs <Space-SubType> sont à indiquer par le programmeur dans un seul sens. L'information saisie est forcément attribuée à toutes les pièces désignées. Par exemple, pour le même exemple de salle d'eau, il suffit de mentionner les <Space-SubType> à proximité desquelles doit être placée une salle d'eau <Space-SubType>, à savoir : la cuisine, le séjour et la salle à manger. Inutile de remplir également l'exigence de proximité de ces derniers <Space-SubType> pour mentionner le <Space-SubType> salle d'eau.

➤ *Fenêtre 3 : Exigences de relation (figure 59)*

Cette feuille permet de saisir les exigences de relation <Relation> entre les pièces d'un bâtiment, conformément aux différentes exigences de relation énumérées par notre modèle (<Direct>, <Indirect>, <Main>, <Visual>, <Physical>). Ce tableau permet au programmeur non seulement de désigner le <space-SubType> concernée par une relation, mais aussi de définir des paramètres sur cette relation, en sélectionnant une valeur parmi une liste de valeurs pré-remplie. Pour les valeurs de paramètres à contenu opposé (relation Intérieur/ Extérieur, Principale/ Secondaire, etc.), une seule valeur de relation est possible entre deux <Space-SubType>. Ainsi, une seule colonne est prévue à cet effet, dans la fenêtre des exigences de relation. Pour les paramètres à contenu Booléen, une colonne est prévue pour chaque valeur

de paramètre, où le programmeur peut indiquer si l'exigence est requise (Oui/Non). Le tableau des exigences de relation comporte ainsi les paramètres suivants :

- En relation avec : conformément à la feuille des exigences d'arrangement, une première colonne permet au programmeur de désigner le <Space-SubType> référencée par cette relation (en sélectionnant un Sous-Type d'espace parmi la liste des Sous-Types),
- Type de relation : indiquer si la relation demandée est Directe ou Indirecte,
- Caractère de relation : indiquer si la relation demandée est Principale ou Secondaire,
- Relation Visuelle : indiquer si la relation requise est visuelle (Oui / Non),
- Relation physique : indiquer si la relation requise est physique (Oui /Non),
- Autre 1 et Autre 2.

Contrairement aux paramètres d'arrangement, la liste des paramètres de relation n'est pas exhaustive. Il peut y avoir encore d'autres paramètres pouvant décrire la relation entre deux <Space-SubType>. Pour cela, le nombre de paramètres de ce tableau est ouvert et deux autres colonnes (Autre 1 et Autre 2) ont été ajoutées permettant au programmeur de définir deux autres paramètres décrivant la relation entre deux <Space-SubType>. Les valeurs de ces deux paramètres additionnels sont prises en compte dans le deuxième tableau permettant au programmeur de définir les valeurs dont il a besoin.

➤ *F4 : Exigences de distribution (figure 60)*

De la même manière, la feuille des exigences de distribution permet au programmeur de sélectionner le <Space-SubType> à travers lequel doit se faire la distribution du <Space-SubType> en question et de choisir les valeurs de paramètres décrivant la distribution parmi une liste de valeurs pré-remplie. Conformément aux exigences de distribution énumérées par notre modèle, la feuille des exigences de distribution comporte les paramètres suivants :

- A partir de : choisir parmi la liste des <Space-SubType>,
- Caractère de distribution : Horizontale ou Verticale,
- Type de distribution : indiquer si la relation est Fréquente ou Occasionnelle,
- Distribution Int/Ext : indiquer si la relation est Intérieure ou Extérieure,
- Distribution Pub/Privé : indiquer si la relation est Publique ou Privée,
- Distribution Prop/Sale : indiquer si la relation est Propre ou Sale,
- Usager : indiquer les usagers,
- Normes : indiquer la norme de distribution à appliquer,
- Autre 1 et Autre 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.2 A proximité de 1	0.2 A proximité de 2	0.2 A proximité de 3	0.2 Loïn de 1	0.2 Loïn de 2	0.2 Appartient à	0.2 Contigue à
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée	Salon						
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon				Garage	Buanderie		Séjour
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM						Salon	
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour	Cuisine						
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Salle d'eau	Garage	Séjour			Buanderie	Salle d'eau
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités	Salle à manger						

Figure 58 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences de disposition <Arrangement>

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.3 En relation avec	0.3 Type de rel	0.3 Caractère de rel	0.3 Relation visuelle	0.3 Relation physique	0.3 Autre 1	0.3 Autre 2
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée				Non	Non		
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon				Non	Non		
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM				Non	Non		
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour	Cuisine		Principale	Oui	Non		
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Garage	Indirecte	Secondaire	Oui Non	Oui		
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités				Non	Non		

Figure 59 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences de relation <Relation>

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.4 A partir de	0.4 Caractère de	0.4 Type de distri	0.4 Int/Ext	0.4 Pub/Privé	0.4 Prop/Sale	0.4 Usagers	0.4 Norme	0.4 Autre 1	0.4 Autre 2
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée										
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon	Hall d'entrée		Fréquente				Invités			
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM										
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour										
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Buanderie	Horizontale	Occasionnelle							
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités										

Figure 60 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences de distribution <Distribution>

7.2.2 Saisie des exigences d'accessibilité

Dans notre modèle, les exigences d'accessibilité ne sont pas divisées en plusieurs catégories d'exigence. Elles sont ainsi synthétisées en une seule feuille dans le tableau des exigences.

➤ *Feuille 5 : Exigences d'accessibilité*

Cette feuille (annexe 5, figure 1) permet de sélectionner le <Space-SubType> à travers lequel doit se faire l'accès <Space-SubType> en question. Elle permet également de spécifier les paramètres décrivant cet accès, conformément aux énumérations des exigences d'accessibilité définies par notre modèle. Ainsi, elle inclut les paramètres suivants :

- Accessible de : choisir parmi la liste des Sous-Types d'espaces,
- Caractère d'accès : indiquer si l'accès est Principal ou Secondaire,
- Type d'accès : indiquer si l'accès est Intérieur ou Extérieur,
- Accès sécurisé : indiquer si l'accès doit être sécurisé (Oui /Non),
- Accès contrôlé : indiquer si l'accès doit être contrôlé (Oui /Non),
- A proximité de : choisir le type d'espace à proximité duquel doit se faire l'accès
- Accès Pub/Privé : indiquer si l'accès doit être Public ou Privé,
- Usagers : indiquer parmi une liste pré-remplie le type d'usagers qui doit occuper la pièce (personnes à mobilité réduite, pompiers, piétons, véhicules, autre),
- Autre 1 et Autre 2.

7.2.3 Saisie des exigences de confort

Bien que notre modèle des exigences de confort prend en considération les types d'exigences de confort énumérés par le modèle IFC, qui sont des exigences quantitatives en majorité. Nous nous concentrons dans ce travail de développement sur les exigences d'ordre qualitatif, c'est-à-dire sur les types énumérés des catégories d'exigences définies par notre modèle des exigences (figure 49), à savoir : les exigences lumineuses <Lighting>, hygrométriques <Hygrometric>, acoustiques <Acoustic>, thermiques <Thermal> et de sécurité <Security>. Ces exigences sont ainsi classées dans le tableau des exigences en cinq feuilles, où chaque feuille permet au programmeur de spécifier un ensemble de paramètres de confort en sélectionnant un choix parmi une liste prédéfinie, conformément aux énumérations des exigences de confort définies par notre modèle (tableau 13).

➤ *Feuille 6 : Exigences lumineuses*

Les exigences lumineuses qualitatives décrivent essentiellement le type d'éclairage à l'intérieur des pièces. La feuille des exigences lumineuses (annexe 5, figure 2) permet ainsi de sélectionner les valeurs de paramètres de type d'éclairage qui sont classées par ordre d'importance, conformément aux énumérations de type d'éclairage définies dans notre modèle :

- Eclairage naturel : indiquer si un éclairage naturel est exigé pour un <Space-SubType> (oui / Non),
- Eclairage artificiel : indiquer si un éclairage artificiel est exigé pour <Space-SubType> (oui/ Non),
- Eclairage homogène : (oui / Non),
- Eclairage ponctuel : (oui / Non),
- Eclairage décoratif : (oui / Non),
- Ensoleillement : (oui / Non),
- Eclairage direct : (oui / Non),
- Eclairage Indirect : (oui / Non),
- Eclairage de sécurité : (oui / Non),
- Autre 1 et Autre 2.

Les valeurs de paramètres des exigences d'éclairage ne sont pas classées par contenu opposé car un même espace peut avoir l'exigences de deux types d'éclairages opposés (ex. de l'éclairage naturel avec de l'éclairage artificiel, ou bien un éclairage direct et un autre indirect).

➤ *Feuille 7 : Exigences hygrométriques*

Conformément à notre modèle des exigences, les exigences hygrométriques qualitatives décrivent essentiellement le type de ventilation à l'intérieur des espaces. Elles mentionnent également la norme de confort hygrométrique à appliquer. Dans le tableau des exigences, la feuille des exigences hygrométriques (annexe 5, figure 3) permet de définir les valeurs des paramètres de ventilation, suivant les énumérations des exigences de ventilation définies par notre modèle, ainsi que l'indication de la norme à appliquer :

- Ventilation naturelle : ventilation naturelle requise (Oui / Non),
- Ventilation mécanique : ventilation mécanique requise (Oui / Non), Ces deux deniers paramètres peuvent également être cumulatifs pour un seul espace,
- Ventilation diurne : ventilation diurne (Oui / Non),
- Ventilation nocturne : ventilation nocturne (Oui / Non),

- Norme : indiquer la norme ou la réglementation de confort thermique à appliquer,
- Autre 1 et Autre 2.

➤ *Feuille 8 : Exigences thermiques*

Conformément à notre modèle des exigences spatiales, la feuille des exigences thermiques (annexe 5, figure 4) permet au programmiste de mentionner le type de traitement thermique des <Space-SubType> (<Heated>, <AirConditioned>), elle lui permet également de sélectionner la réglementation thermique à appliquer parmi une liste pré-remplie. Cette feuille comporte les paramètres suivants :

- Climatisation : climatisé (Oui / Non),
- Chauffage : chauffé (Oui / Non),
- Norme thermique : indiquer la réglementation thermique à appliquer.

➤ *Feuille 9 et Fenêtre 10 : Exigences acoustiques et exigences de sécurité*

Suivant notre modèle des exigences et conformément aux observations illustrées au niveau du travail d'analyse de contenu de document de programmation architecturale (chapitre 3), les exigences qualitatives concernent essentiellement les normes et les réglementations relatives à chaque pays. La feuille des exigences acoustiques (annexe 5, figure 5) et celle de sécurité (Annexe 5, figure 6) permettent au programmiste de sélectionner la réglementation à appliquer, parmi une liste de réglementations pré-remplie.

Les colonnes des paramètres des différentes feuilles du tableau des exigences (Excel) étant initialement vides, le programmiste est appelé à remplir uniquement les valeurs de paramètres dont il a besoin. Nous rappelons que, selon la démarche proposée, le programmiste doit fournir au concepteur une étude de programmation accompagnée de ce tableau (Excel) qui résume les exigences qualitatives sur les pièces demandées. Sur la base de ce fichier Excel, le concepteur intègre les exigences du programme dans Revit, afin de les prendre en considération dans sa conception. Au fur et à mesure de l'avancement de la conception, il pourra ainsi vérifier la conformité de son modèle de conception aux exigences requises.

7.3 Intégration des exigences spatiales qualitatives dans Revit

La prise en compte des ESQ_L au sein de l'outil BIM est l'objectif principal de ce travail de recherche. Elle constitue une étape clé qui permet aux concepteurs de consulter les exigences sur les pièces, de concevoir en tenant compte de ces exigences et de vérifier la conformité des modèles BIM conçus tout au long du processus de conception. Pour ce faire, trois scripts ont été développés à l'aide de l'outil de programmation visuelle Dynamo. Ces scripts représentent le lien entre le tableau des exigences (Excel) et l'outil de conception (Revit). Ils sont fournis au concepteur pour être exécutés avant le commencement de la conception dans l'objectif de favoriser une démarche de conception qui prend en compte les ESQ_L dès les premières ébauches de la conception. Ces trois scripts reposent sur la fonction « *Excel.ReadFromFile* » de Dynamo qui permet de lire les données du fichier Excel, pour les ajouter ensuite à Revit selon le type de données en question et permettant les fonctionnalités suivantes :

- ajout des pièces du programme à Revit : ce script utilise la fonction « *LunchBox Create Room by Name and Number* » qui permet d'ajouter les pièces du programme par nom et par nombre à la liste des nouvelles pièces de Revit,
- ajout des noms des paramètres d'exigences : ce script utilise la fonction « *Parameter.Create CharedParameter* » qui permet de créer de nouveaux paramètres aux pièces,
- ajout des valeurs des paramètres : ce script utilise la fonction « *Element.SetParameter ValueByName* » qui permet d'ajouter les valeurs de paramètres exigées par le programme à la liste des nouveaux paramètres ajoutés.

7.3.1 Ajout des pièces du programme à Revit

Le premier script développé au niveau de cette étude (figure 61) permet au concepteur d'ajouter les noms des pièces demandées par le programme dans Revit. Il permet principalement de faire deux traitements, à savoir :

Extraire la liste des noms et des identifiants des pièces du programme du tableau des exigences ;

Le script permet d'abord de lire les données concernant les noms et les identifiants des pièces à partir du tableau des exigences à travers le nœud « *Excel.ReadFromFile* », en mentionnant l'emplacement du tableau Excel à lire et le nom de la feuille des exigences en question (*SheetName*). Il permet ensuite d'extraire la liste des noms et des identifiants des pièces à

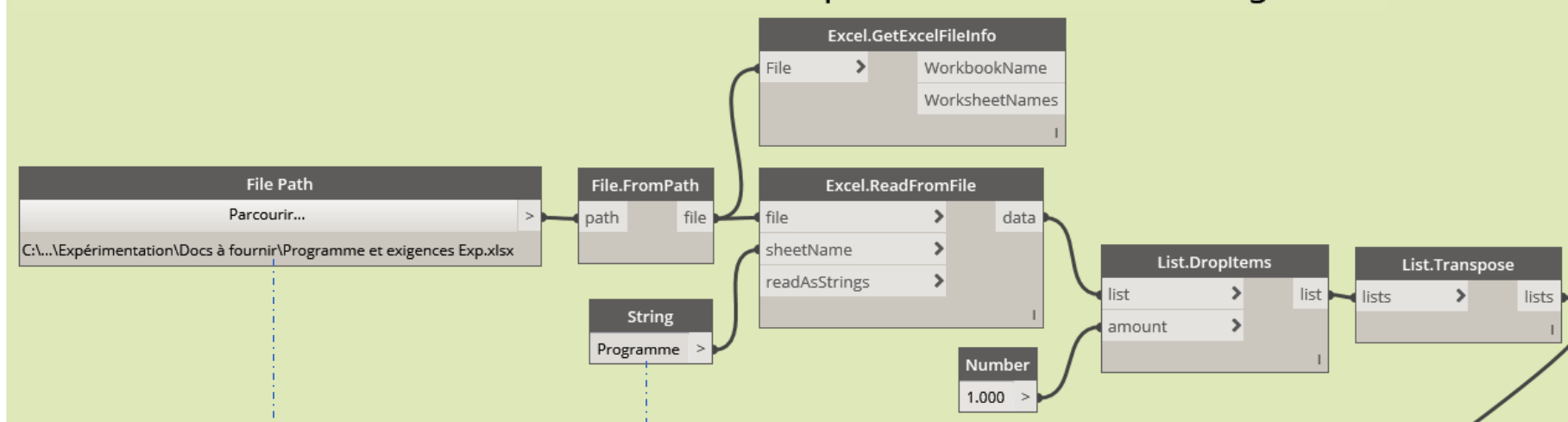
travers le nœud « *List.GetItemAtIndex* », en faisant appel aux numéros des colonnes en question du tableau des exigences (soit les colonnes A et D).

Créer des nouvelles pièces par nom et par nombre (ID) sur Revit ;

La création des nouvelles pièces sur Revit se fait à travers le nœud « LunchBox Create Room By Name And Number » (Lunch Box package).

En exécutant ce script, la liste des nouvelles pièces de Revit est remplie par la liste des sous-Types d'espaces <Space-SubType> du programme (figure 62).

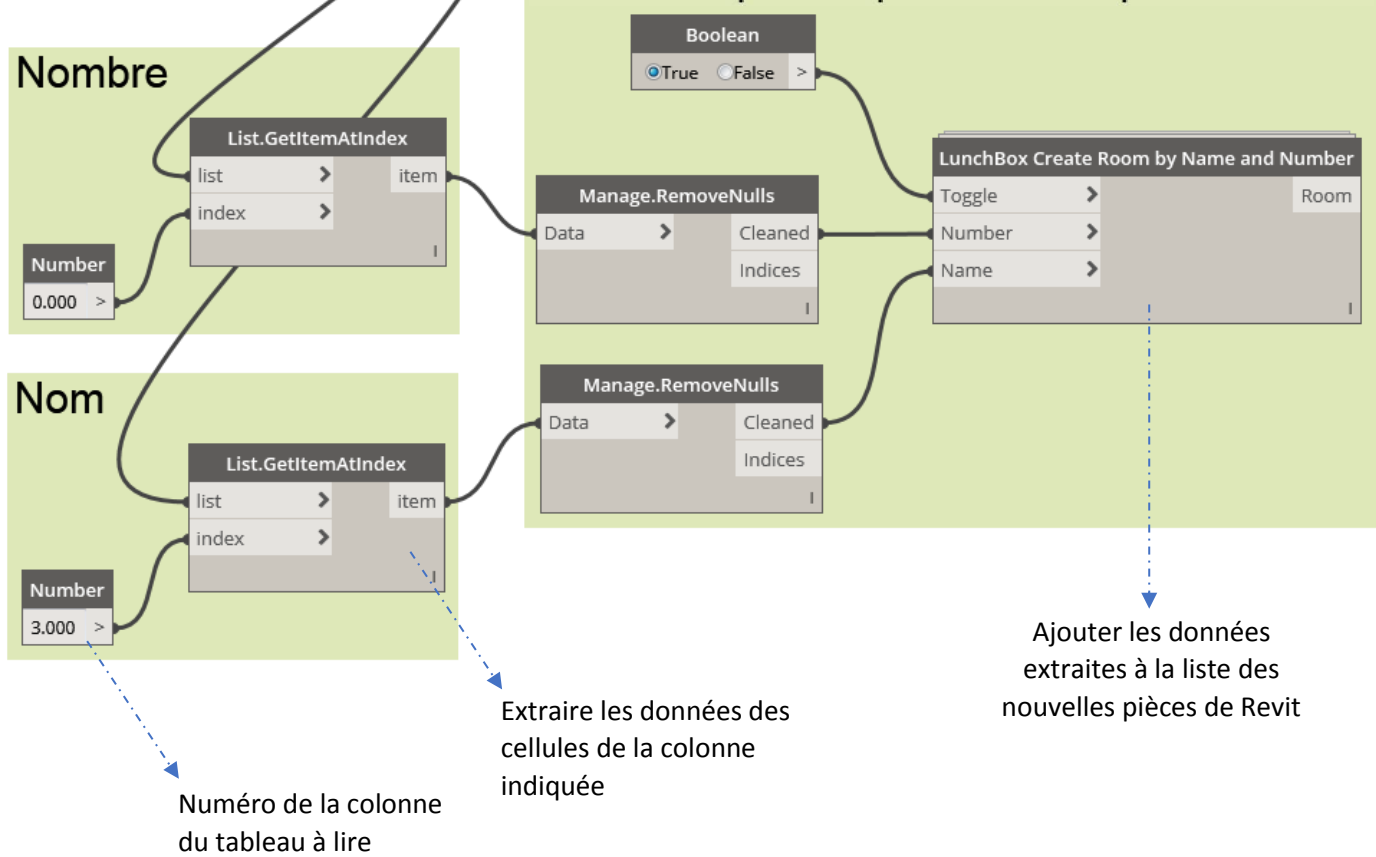
Extraire la liste des noms et des identifiants des pièces du tableau des exigences



Emplacement du fichier Excel à lire (tableau des exigences)

Nom exact de la feuille du tableau à lire

Créer des pièces par Nom et par Nombre



Ajouter les données extraites à la liste des nouvelles pièces de Revit

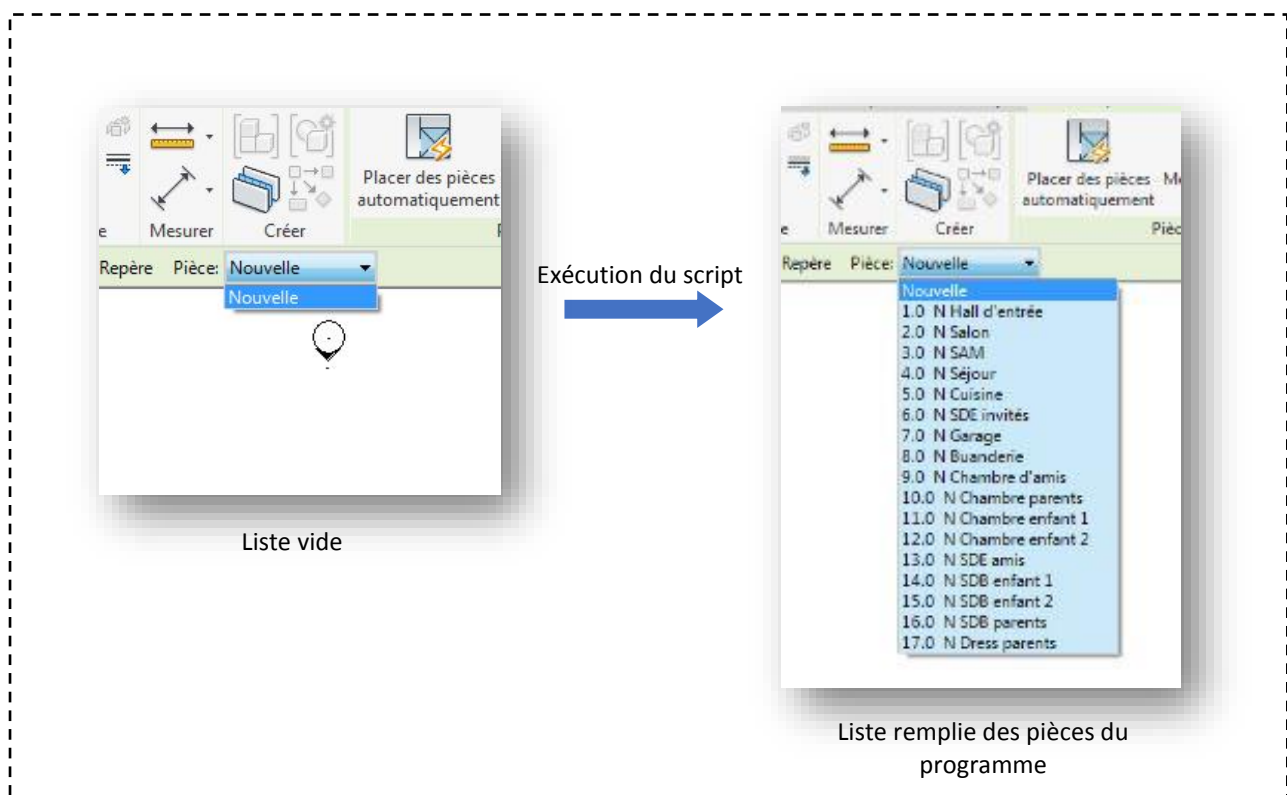


Figure 62 Captures d'écran Revit, liste des nouvelles pièces avant et après l'exécution du script d'ajout des pièces

7.3.2 Ajout des noms des nouveaux paramètres à Revit

Pour pouvoir ajouter les noms des nouveaux paramètres d'exigences sur Revit, il faut tout d'abord créer un nouveau fichier de paramètres partagés⁸². Ce fichier sert à classer les paramètres par nom et par catégorie d'exigence en respectant notre modèle des exigences. La création de ce fichier est faite à travers la fonction « Paramètres Partagés » de Revit. Il est à noter que cette fonction permet d'ajouter des groupes de paramètres, d'insérer des paramètres partagés, de définir le type de paramètre (Longueur, surface, texte, etc.) et de sélectionner l'objet ou les objets du modèle auxquels le paramètre en question sera associé. Cependant, cette démarche se montre fastidieuse surtout quand il s'agit de l'ajout d'un grand nombre de paramètres partagés, où le concepteur se trouve obligé de répéter la même démarche autant de fois que de paramètres. Ainsi, nous proposons à travers ce prototype d'automatiser ces tâches. Ainsi, les informations nécessaires concernant la classification des paramètres d'exigences ont été regroupées dans le tableau des exigences (Excel), où une dernière feuille a été ajoutée (figure 63). Cette feuille contient le nom et la catégorie (ou le groupe) de chaque paramètre du tableau des exigences, le type des données autorisées (ex. Text, Integer, Length). Ensuite, un script permettant d'ajouter automatiquement tous ces paramètres a été mis en place. Ce script (Figure 65) permet de faire les traitements suivants :

extraire les données des paramètres partagés du tableau des exigences ;

Idem que script 1.

ajouter ces données dans le nouveau fichier de paramètres partagés ;

Ceci se fait à travers le noeud *Parameter.CreateSharedParameter* qui permet de représenter ces données dans la liste des propriétés de Revit. Par l'indication de la catégorie des éléments du modèle à laquelle ces paramètres seront associés (la catégorie des pièces) et le groupe de paramètres dans lequel elles seront ajoutées (les contraintes).

L'exécution du présent script engendre le classement des paramètres dans le fichier de paramètres partagés ainsi créé (figure 64) et l'ensemble de ces paramètres est désormais ajouté à la liste des propriétés des pièces sur Revit dans le groupe des contraintes.

⁸² Les paramètres partagés sont des définitions de paramètres qui peuvent être utilisés dans plusieurs projets ou familles. Ils sont stockés dans un document texte indépendant, accessible depuis différents projets ou familles Revit.

En exécutant ce script, le concepteur aura les nouveaux paramètres d'exigences spécifiés par notre modèle d'espace, dans la liste des propriétés des pièces sur la plateforme de Revit (figure 66).

	A	B	C
1	Nom de paramètre	Groupe de paramètre	Type de paramètre
2	0.1 Type	Exigences du programme	Text
3	0.1 Sous-Type	Exigences du programme	Text
4	0.1 Surface prévue	Exigences du programme	Area
5	0.2 A proximité de 1	Exigences d'arrangement	Text
6	0.2 A proximité de 2	Exigences d'arrangement	Text
7	0.2 A proximité de 3	Exigences d'arrangement	Text
8	0.2 Loin de 1	Exigences d'arrangement	Text
9	0.2 Loin de 2	Exigences d'arrangement	Text
10	0.2 Contigue à	Exigences d'arrangement	Text
11	0.2 Appartient à	Exigences d'arrangement	Text

Figure 63 Capture d'écran Excel, extrait de la feuille des paramètres partagés

```
# This is a Revit shared parameter file.
# Do not edit manually.
*META VERSION MINVERSION
META 2 1
*GROUP ID NAME
GROUP 1 Exigences du programme
GROUP 2 Exigences d'arrangement
GROUP 3 Exigences de relation
GROUP 4 Exigences de distribution
GROUP 5 Exigences d'accessibilité
GROUP 6 Exigences déclairement
GROUP 7 Exigences thermiques
GROUP 8 Exigences hygrométriques
GROUP 9 Exigences acoustiques
GROUP 10 Exigences de sécurité
*PARAM GUID NAME DATATYPE DATACATEGORY GROUP VISIBLE DESCRIPTION USERMODIFIABLE
PARAM 623bb802-089c-4c1c-aa8b-f9eb06315de5 0.8 Autre 2 TEXT 8 1
PARAM bb6ec904-c1df-4e96-9f76-98cad5f91976 0.1 Sous-Type TEXT 1 1
PARAM ebe8f911-7d09-42b3-a8a3-b2e25a5b4916 0.2 A proximité de 2 TEXT 2 1
PARAM a5bf4815-689d-4c9a-80c5-decb26287e2e 0.6 Lumière TEXT 6 1
PARAM c0581217-7843-4733-b81a-7a90639cf43f 0.8 Ventilation renforcée TEXT 4 8
PARAM c8784418-500a-4020-a4e3-2e5178d6a194 0.4 Autre 1 TEXT 4 1
PARAM bf7f201c-e8df-41d9-90c5-443d3f7abffe 0.4 Autre 2 TEXT 4 1
PARAM 59c4491f-ec21-4851-8c22-e5753fbc1653 0.6 Ensoleillement TEXT 6 1
PARAM a55a9a20-1b51-42e9-adfe-0975d1936d05 0.3 Relation contrôlée TEXT 3 1
PARAM b0a02921-ca7e-4745-96fb-676b77999d17 0.2 Appartient à TEXT 2 1
PARAM ae40372f-b49d-4106-90fe-bf9a75e2a36a 0.5 Largeur de passage ≥ à LENGTH 2 5
```

Figure 64 Extrait du fichier de paramètres partagés créé

Extraire les données des paramètres partagés du tableau des exigences

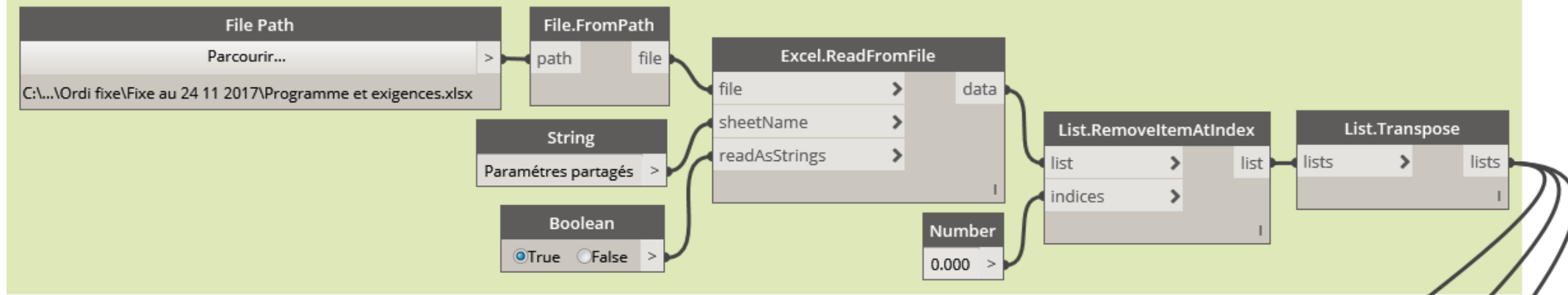


Figure 65 Capture d'écran Dynamo, script d'ajout des nouveaux paramètres d'exigence à Revit

Ajouter les données dans le fichier de paramètres partagés

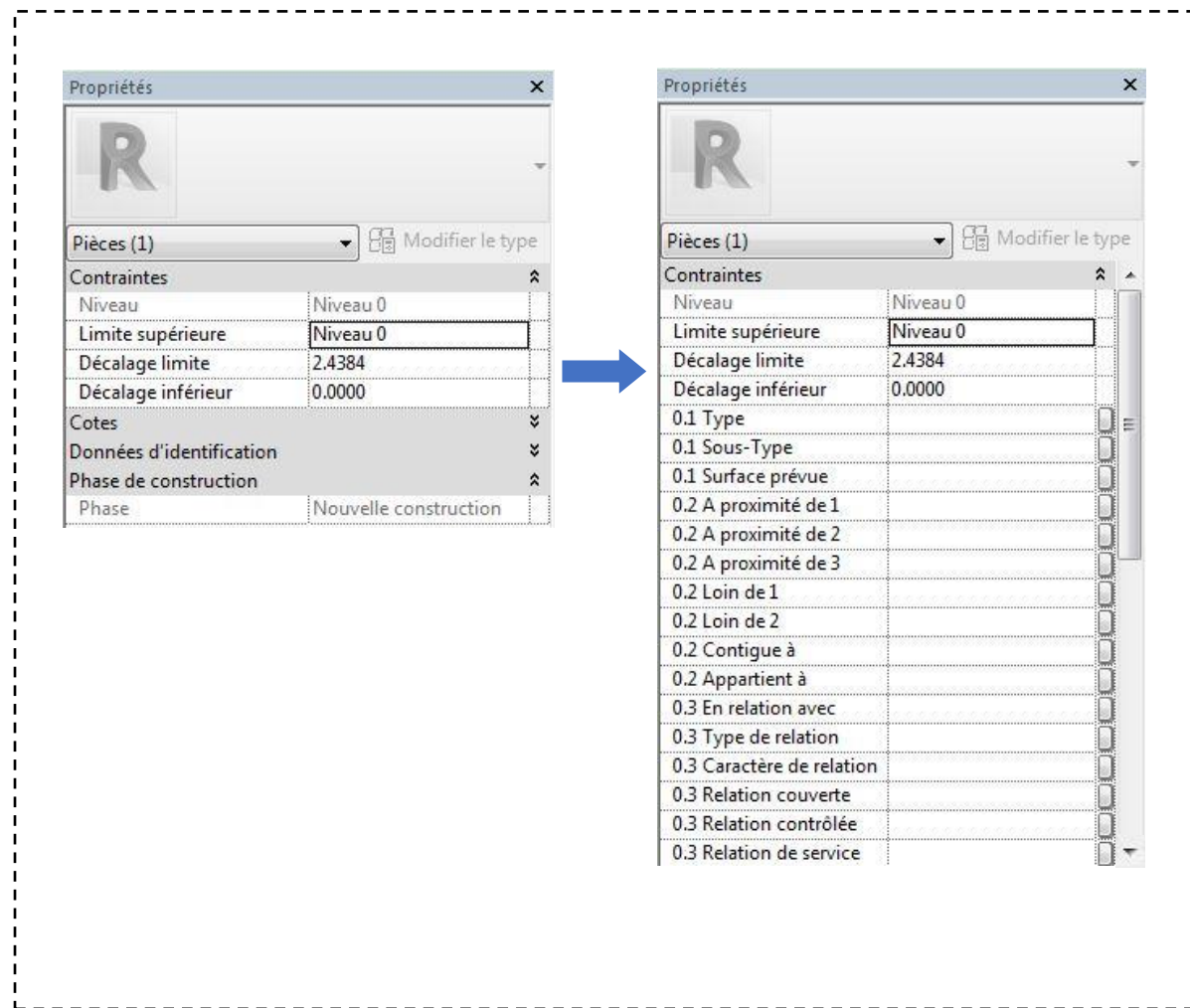
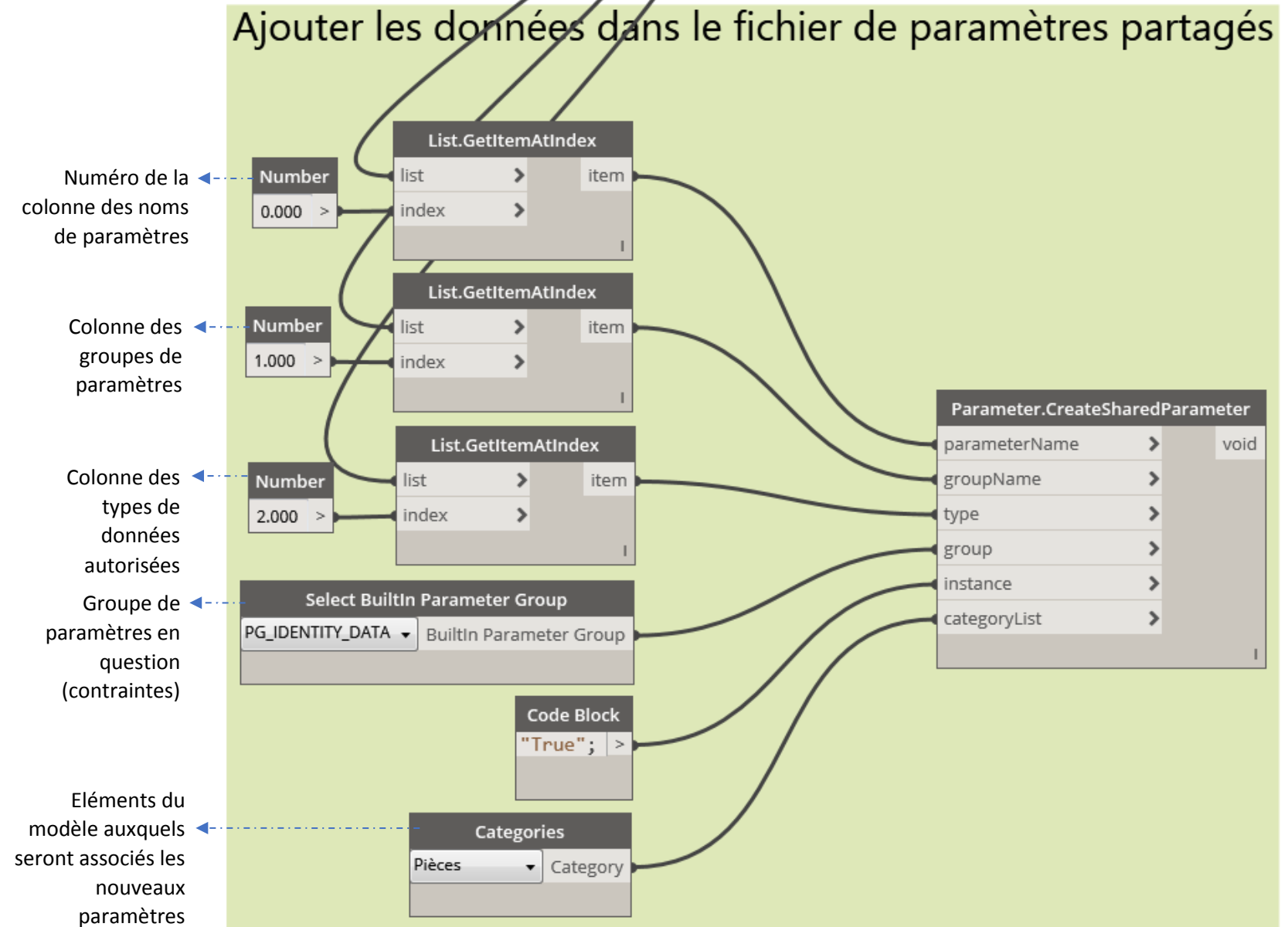


Figure 66 Capture d'écran Revit, extrait de la liste des propriétés des pièces avant et après exécution du script d'ajout des nouveaux paramètres à Revit



7.3.3 Ajout des valeurs des nouveaux paramètres à Revit

Après avoir ajouté les noms des paramètres d'exigences à Revit, les valeurs des paramètres indiquées dans le tableau des exigences sont extraites du tableau des exigences (Excel) et ajoutées à la liste des valeurs des propriétés de Revit. Le script en question (figure 67) permet de :

```
extraire les valeurs des paramètres partagés du tableau des exigences ;  
pour chaque paramètre ;  
    ajouter valeur ;  
finPour ;
```

Les valeurs de paramètres sont ajoutées sur Revit à travers le nœud *Element.SetParameterByName*. Ce nœud permet d'ajouter les valeurs extraites en se basant sur deux entrées, à savoir ; le nom de chaque paramètre et la valeur correspondante. La figure 14 montre un extrait du script de l'ajout des valeurs de paramètres. Cet extrait porte uniquement sur l'ajout de trois valeurs de paramètres, à savoir : *<0.1 Type>*, *<0.1 Sous-Type>* et *<0.5 Accessible de>*. Le script d'ajout des valeurs de paramètres à Revit inclut toutes les catégories d'exigences et les paramètres du tableau des exigences. Son exécution permet d'ajouter toutes les valeurs de paramètres à Revit en les représentant dans le tableau des propriétés des pièces dans le groupe des contraintes, en un seul clic (figure 68).

A cette étape du travail de développement, nous avons pu intégrer l'ensemble des ESQ_L spécifiées par notre modèle d'espace au sein de l'outil Revit et atteindre, par conséquent, le premier objectif du développement du prototype. Or, notre objectif de ce travail de développement n'est pas de résoudre uniquement la problématique de l'intégration des ESQ_L dans l'outil BIM, mais aussi de résoudre la problématique du respect de ces exigences tout au long du processus de conception. Permettre au concepteur de vérifier la conformité de son modèle de conception aux ESQ_L demandées par le programme permet la validation des hypothèses de ce travail de recherche. Le volet de vérification permet ainsi de confirmer que la prise en compte des ESQ_L dans les pratiques BIM permettrait de produire des modèles BIM plus conformes aux exigences. Ayant l'ensemble des paramètres d'exigences et leurs valeurs sur la plateforme Revit, le concepteur pourra désormais accéder à ces données directement sur Revit pour les consulter ou même pour pouvoir vérifier la conformité de sa conception aux ESQ_L mentionnées par le programme architectural, sans devoir sortir de l'outil de conception pour consulter le programme.

Extraire les valeurs des paramètres partagés du tableau des exigences

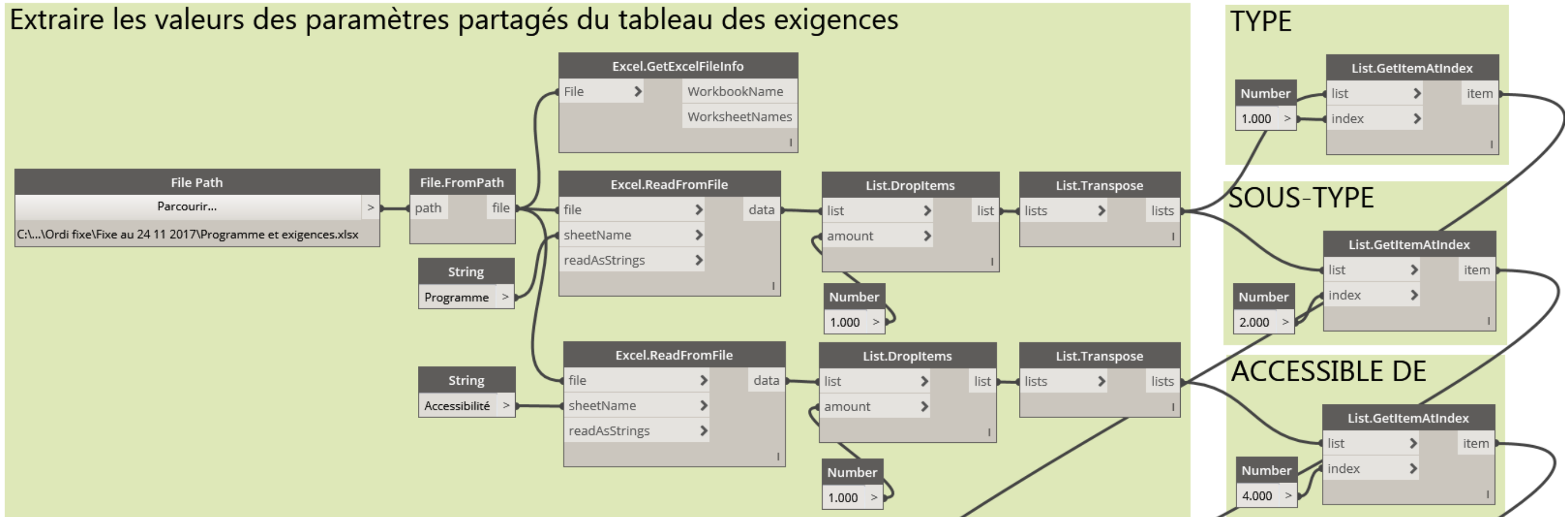
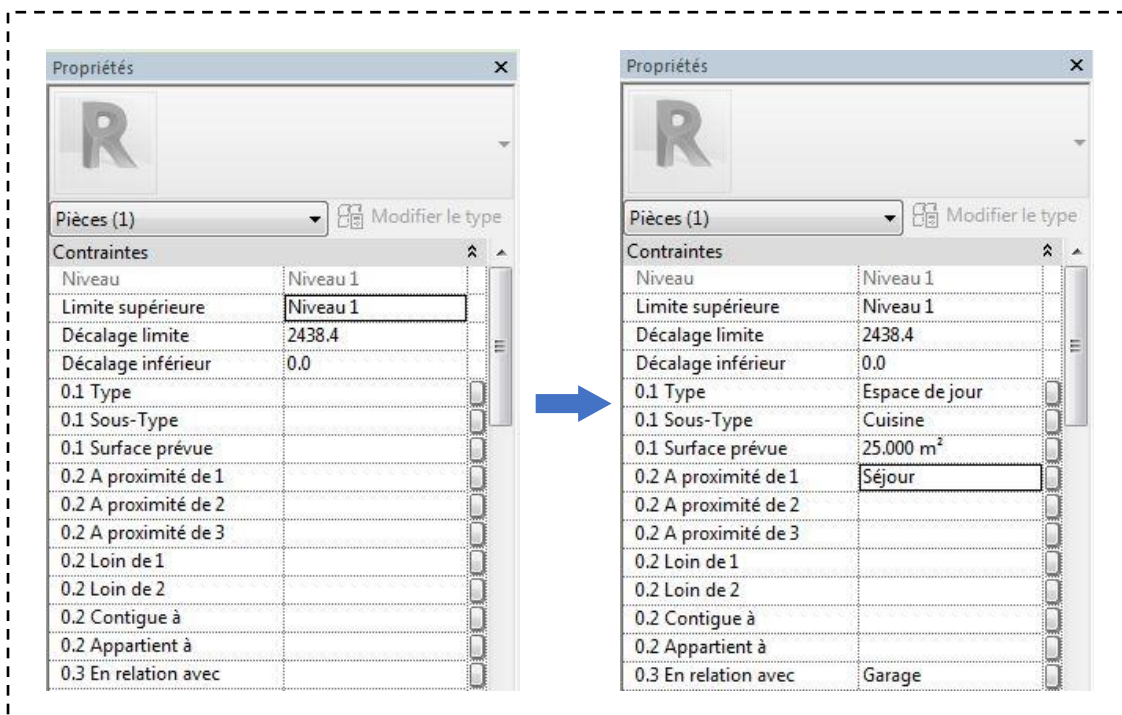


Figure 67 Capture d'écran Dynamo, extrait du script d'ajout des valeurs de paramètres



Ajouter les valeurs de paramètres

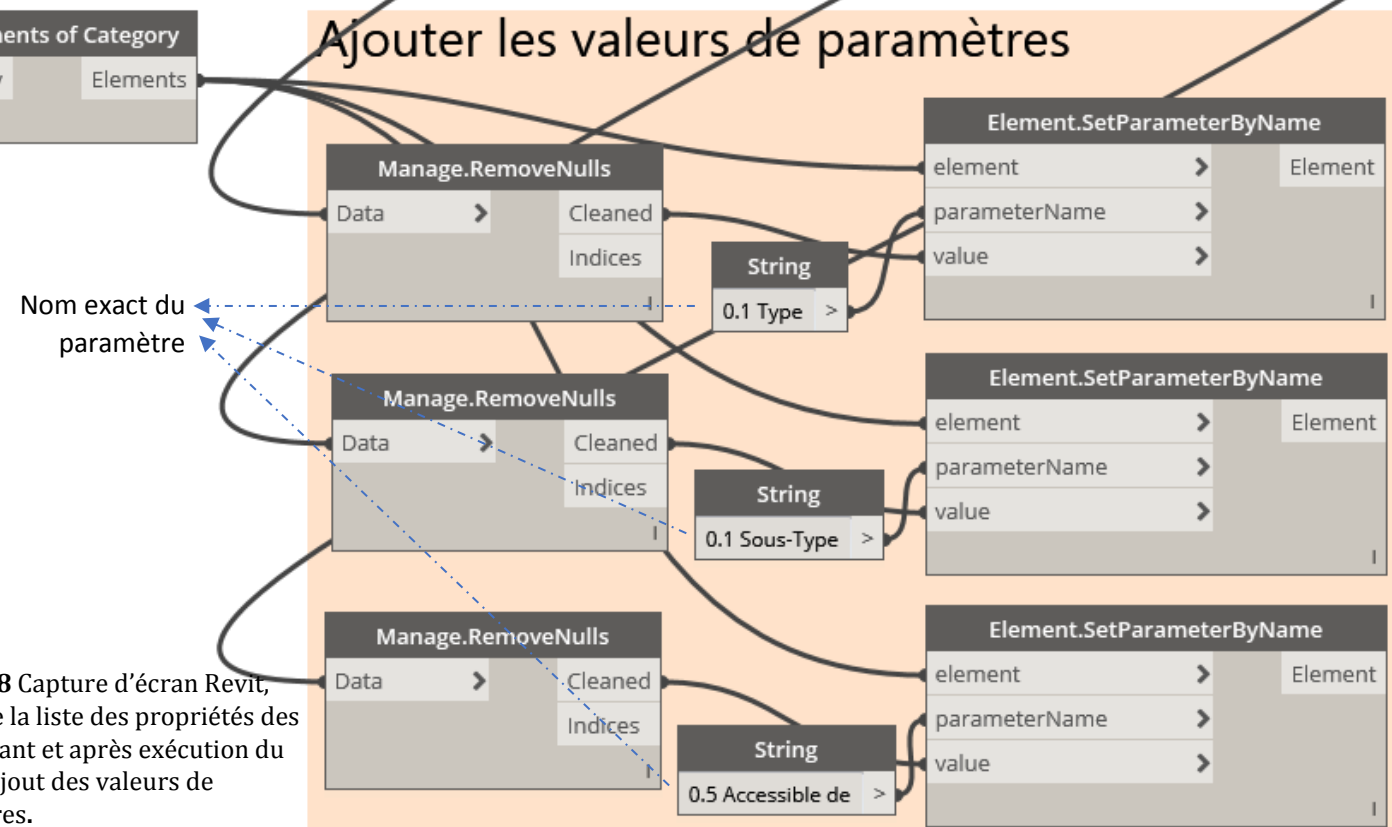


Figure 68 Capture d'écran Revit, extrait de la liste des propriétés des pièces avant et après exécution du script d'ajout des valeurs de paramètres.

7.4 Vérification des exigences spatiales qualitatives dans Revit

Nous nous intéressons dans ce qui suit au développement des scripts permettant de vérifier si la conception est conforme aux exigences intégrées à la plateforme Revit. Ayant les pièces demandées par le programme et leurs valeurs de paramètres d'exigences, le concepteur peut commencer la conception (figure 69). Il visualise ces pièces en les disposant selon les exigences topologiques de chacune (visibles parmi les contraintes de la pièce sélectionnée), formant ainsi comme un organigramme fonctionnel qui prend en compte les exigences de topologie et d'accessibilité des pièces demandées (figure 69.a). Au niveau de cette étape, le concepteur manipule des pièces non encore délimitées qui ne possèdent pas encore de forme. Après avoir mis en place les différentes pièces, il passe ensuite à l'ajout des éléments délimitant comme les murs, les poteaux, les dalles, les portes, les fenêtres, etc. formant ainsi une première réponse architecturale (figure 69.b). Au fur et à mesure de l'avancement de la conception, le concepteur peut vérifier l'adéquation de son modèle aux ESQ_L demandées par le programme.

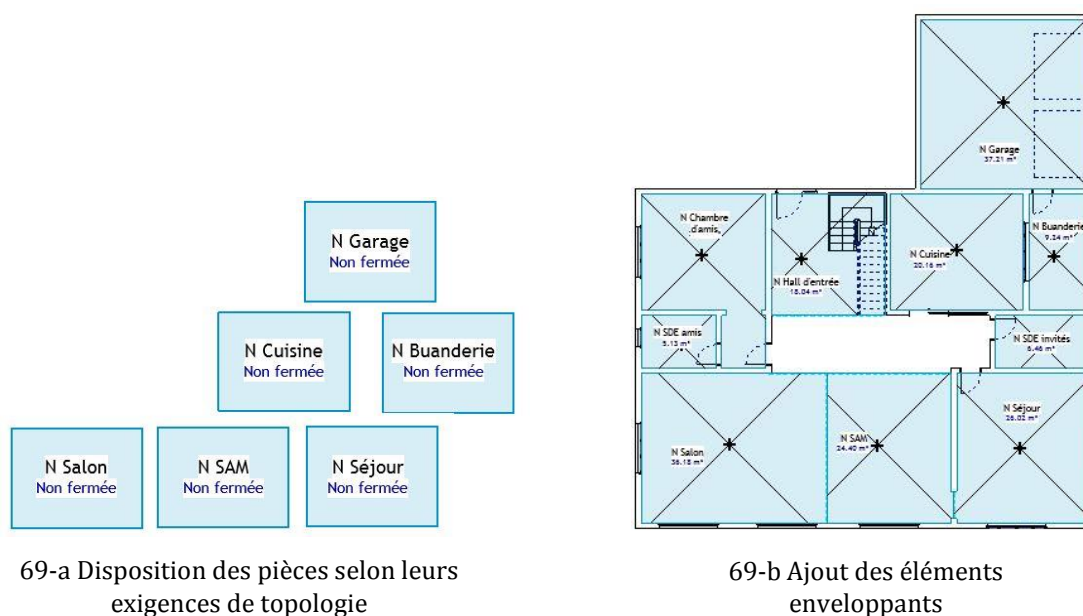


Figure 69 Exemple de début de conception

Pour pouvoir passer au volet de la vérification, nous avons d'abord définis les règles nécessaires à la vérification de chaque paramètre d'exigence (annexe 6). Ensuite, ces règles ont été traduites en scripts Dynamo permettant de mettre en évidence graphiquement les pièces selon leur conformité aux exigences⁸³, sur la plateforme même de Revit. La mise en

⁸³ Conformément au programme architectural et aux exigences spatiales introduites à Revit, un simple modèle de conception a été conçu pour tester le fonctionnement des scripts développés.

évidence graphique des pièces qui ne respectent pas les exigences du programme a pour objectif d'assister le concepteur à vérifier son modèle de conception de façon à respecter au mieux les ESQ_L. Au niveau de cette étude, nous sommes parvenus à développer neuf scripts de vérification qui touchent à la plupart des catégories d'exigences identifiées, à savoir les scripts de vérification des paramètres de :

- l'éclairage naturel,
- l'ensoleillement,
- la ventilation naturelle,
- la distribution horizontale,
- la distribution verticale,
- la relation entre les pièces,
- la proximité entre les pièces,
- la contiguïté des pièces, et enfin
- l'accès direct d'une pièce depuis une autre.

Nous passons dans ce qui suit à la présentation de la règle de vérification de chaque paramètre d'exigence, suivie de l'enchaînement du script Dynamo correspondant et de quelques exemples d'exécution. Les scripts Dynamo proprement dits ne sont pas présentés dans cette thèse à cause de leur volume important, de la multiplicité des nœuds utilisées à l'intérieur et à la complexité des relations entre les nœuds. Nous tenons toutefois à présenter à titre d'exemple le premier script de vérification qui est relativement simple par rapport au reste des scripts.

7.4.1 Visualisation et réinitialisation de vue

Pour la mise en évidence des propriétés qui ne satisfont pas aux paramètres d'exigence requis, le résultat de chaque script de vérification est visualisé sur l'interface graphique de Revit en couleur. Ceci est fait à travers le nœud *Element.OverrideColorInView*, en indiquant comme entrées les identifiants des pièces à colorer et le code de couleur à appliquer au remplissage intérieur. Pour cela, nous avons défini le code de couleurs suivant :

- **rouge** : pour les pièces qui ne respectent pas l'exigence,
- **vert** : pour les pièces qui respectent l'exigence.

Ces couleurs sont appliquées au remplissage intérieur des pièces (initialement visualisées en bleu dans Revit). La visualisation du résultat de chaque script se fait par niveau. Ainsi, pour vérifier la totalité de son modèle BIM, le concepteur doit vérifier les différents niveaux. Après chaque vérification, les pièces du modèle sont visualisées en couleurs (rouge et/ou vert). Pour retrouver la visualisation initiale des pièces (en bleu) après vérification, un script de réinitialisation de vue a été développé (figure 70). Ce script repose sur le nœud *Element.ResetOverridesInView* et permet de réinitialiser les vues pour pouvoir passer d'un script de vérification à un autre. L'alternance entre l'exécution des scripts de vérification et de réinitialisation de vue est facilité à travers le lecteur *Dynamo Player* qui assure l'exécution des scripts Dynamo dans une fenêtre volante tout en restant dans Revit (figure 71).

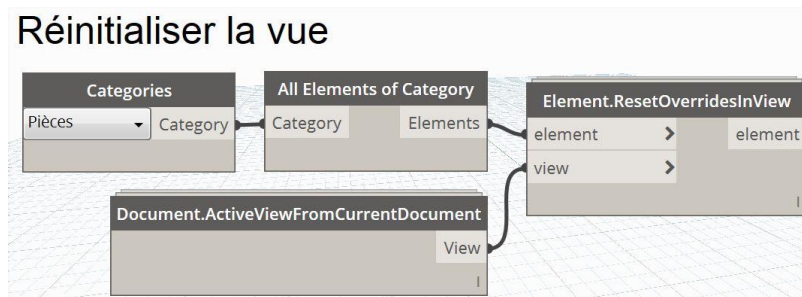


Figure 70 Capture d'écran Dynamo, Script de réinitialisation de vue

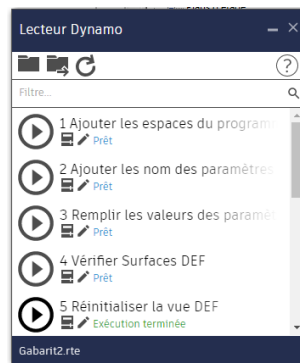


Figure 71 Captures d'écran Revit, fenêtre volante du lecteur Dynamo Player.

7.4.2 Vérification de l'éclairage naturel des pièces

➤ Règle

Pour qu'une pièce soit naturellement éclairée, elle doit avoir au moins une ouverture (fenêtre ou porte-fenêtre) qui donne sur l'extérieur. C'est-à-dire une ouverture qui appartient à un mur extérieur (figure 72).

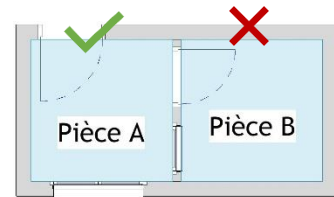


Figure 72 Exemple simplifié de pièce qui satisfait la règle.

➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

Sur la base de cette règle, la vérification de l'éclairage naturel des pièces se fait en respectant l'enchaînement suivant :

```
Sélectionner la liste des pièces dont le paramètre d'éclairage naturel == Oui ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner la liste des fenêtres et les fonctions des murs hôtes correspondants ;  
finPour ;  
Si liste des fenêtres  $\geq 1$  ;  
    ET ;  
    Si fonction du mur hôte == Extérieur ;  
        Alors visualiser la pièce en vert ;  
        Sinon visualiser la pièce en rouge ;  
    finSi ;  
finSi ;
```

Traduit en script dynamo (figure 74), cet enchaînement permet au concepteur de détecter, en un seul clic, les pièces qui ne respectent pas l'exigence d'éclairage naturel. Il peut ainsi décider selon le cas, soit de revoir sa conception en ajoutant les ouvertures manquantes, soit de la garder et d'ignorer la visualisation en couleur et réinitialiser la vue. La figure 20 montre un exemple de visualisation avant et après l'exécution du script de vérification de l'éclairage naturel.

7.4.3 Vérification de la ventilation naturelle des pièces

Pour assurer une ventilation naturelle d'une pièce, nous devons vérifier également si cette pièce contient au moins une ouverture et que cette ouverture appartient à un mur hôte extérieur. Le script pour cette vérification est le même que celui de la vérification de l'éclairage

naturel. Il s'agit juste de saisir le nom du paramètre *0.8 Ventilation naturelle* comme entrée du nœud *Element.GetParameterValueByName*.

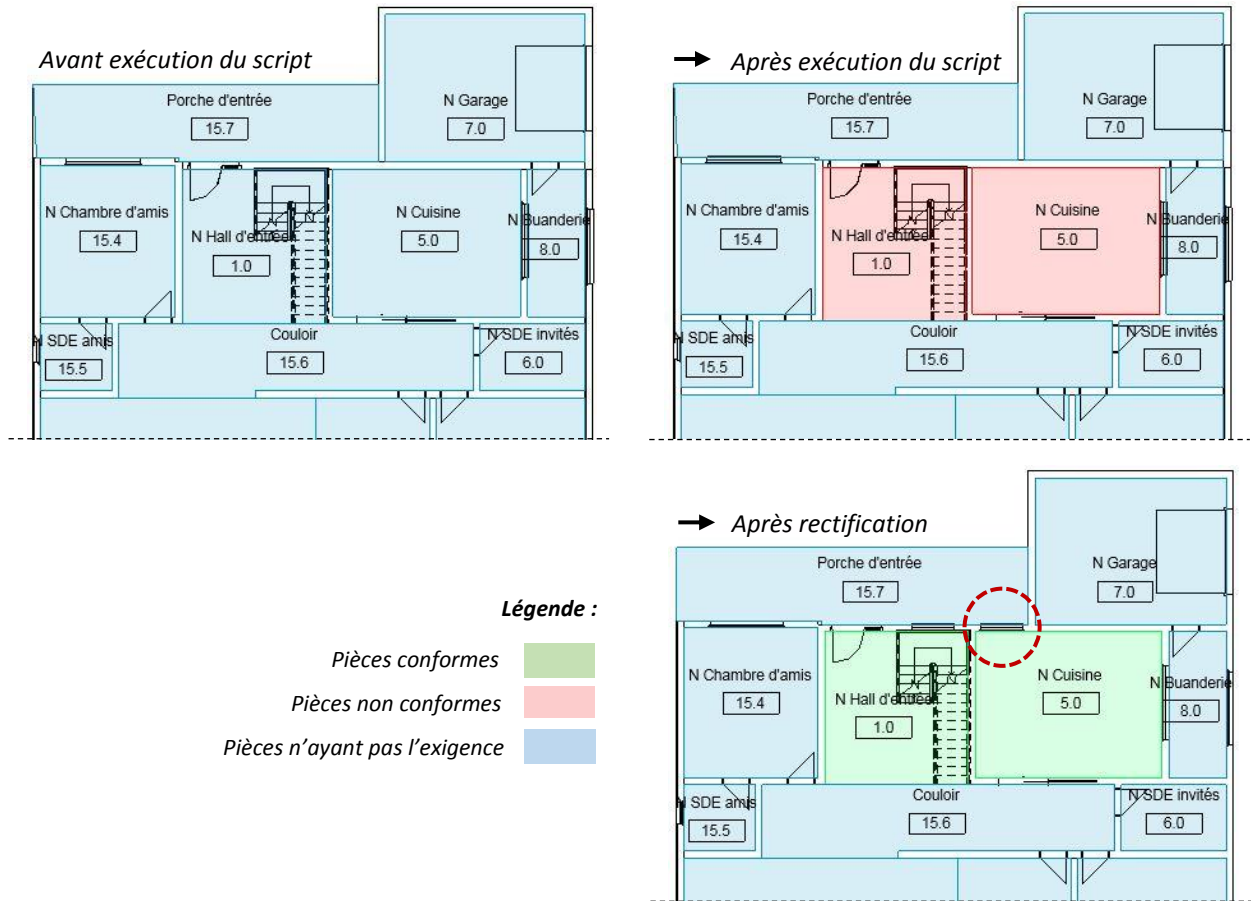
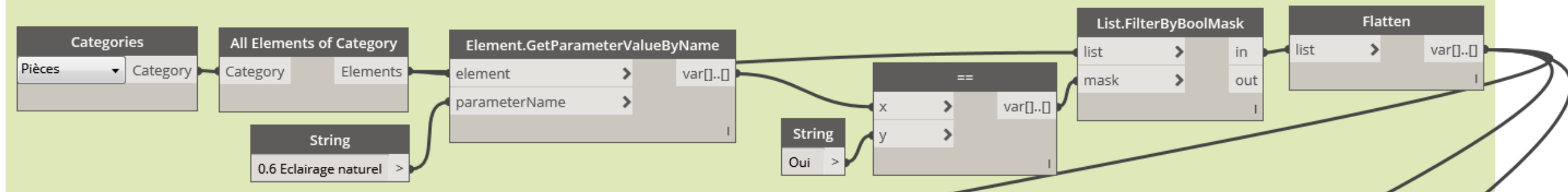
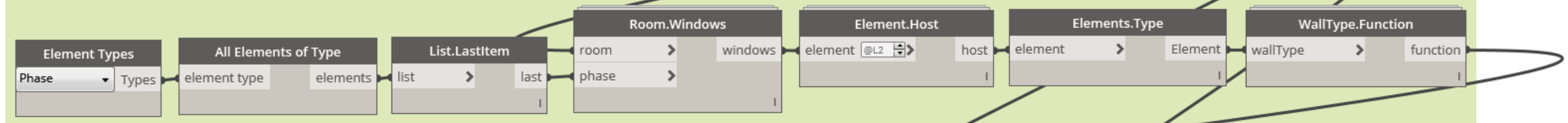


Figure 73 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de l'éclairage naturel

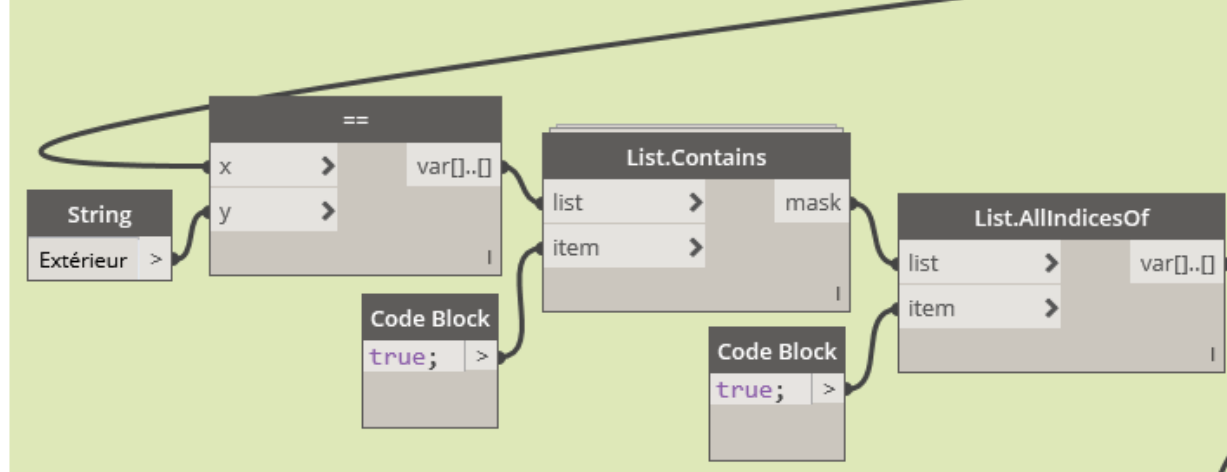
Sélectionner la liste des pièces dont le paramètre d'éclairage naturel == Oui



Sélectionner la liste des fenêtres et les fonctions des murs hôtes correspondants



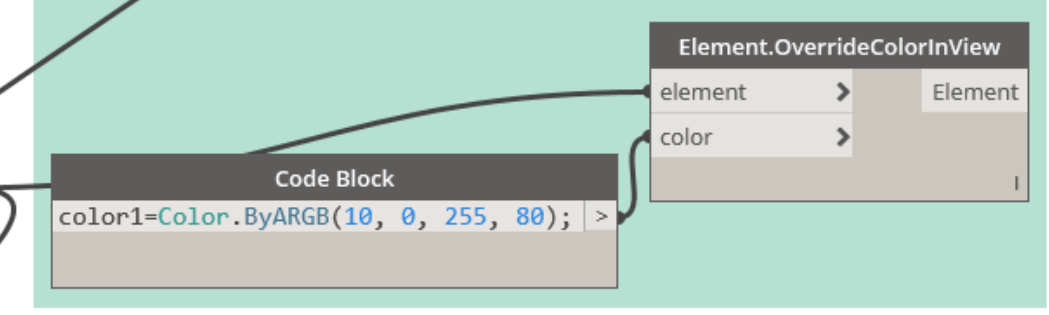
Vérifier si liste des fenêtres ≥ 1
Et fonction du mur hôte == Extérieur



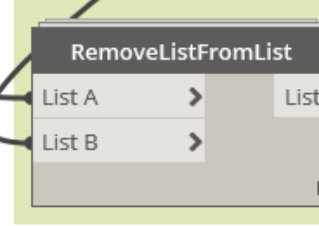
Pièces conformes à l'exigence



Visualiser la pièce en vert



Pièces non conformes



Visualiser la pièce en rouge

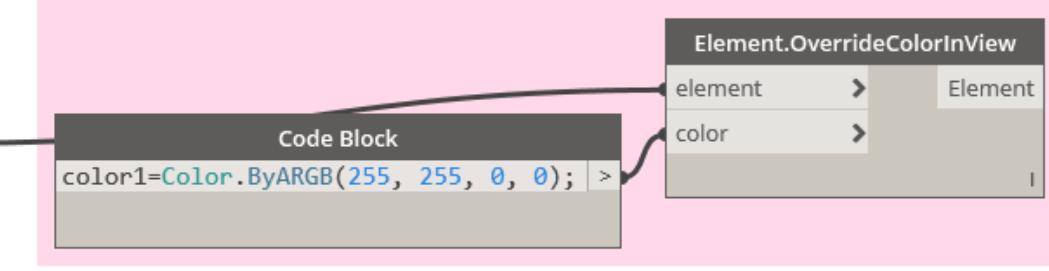


Figure 74 Capture d'écran Dynamo, Script de vérification de l'éclairage naturel des pièces

7.4.4 Vérification de l'ensoleillement

L'ensoleillement est le rayonnement solaire que reçoit une surface au cours d'une période donnée. Il varie selon la période de la journée, mais aussi selon la période de l'année. Le soleil trace une trajectoire circulaire plus ou moins haute qui varie au cours de l'année, faisant varier la durée de la journée d'une saison à une autre (Figure 75).

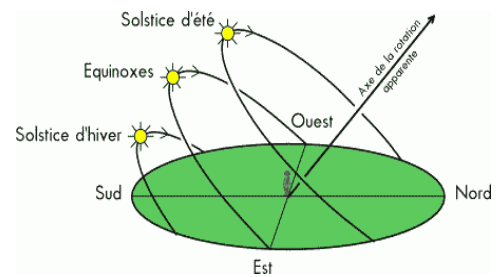


Figure 75 Trajectoires du soleil selon la période de la journée et celle de l'année

Le solstice d'hiver représente la trajectoire la plus courte du soleil, et par conséquent la journée la plus courte de l'année. Tandis que le solstice d'été représente la journée la plus longue. Les équinoxes correspondent aux journées recevant théoriquement autant d'heures d'ensoleillement que d'heures d'ombre. Néanmoins, en pratique durant les équinoxes les heures de lumière solaire dépassent légèrement celles d'ombre. Ceci est dû au phénomène de réfraction atmosphérique qui fait durer un peu plus la lumière du jour.

➤ Règle

Pour pouvoir satisfaire l'exigence d'ensoleillement d'une pièce tout au long de l'année, nous devons vérifier l'orientation de ses ouvertures par rapport à la trajectoire la plus courte du soleil. Dans le cas de notre exemple d'application choisi, au solstice d'hiver en Tunisie, le soleil se lève à 120° à l'est et se couche à 240° à l'ouest (figure 76). On suppose ici que le bâtiment en question est bien exposé au soleil, c'est-à-dire que la construction à laquelle appartient la pièce, ainsi que les constructions voisines respectent bien la réglementation de droit à l'ensoleillement⁸⁴.

➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

Le présent script permet de vérifier si chaque pièce ayant l'exigence d'ensoleillement possède effectivement au moins une ouverture qui donne sur l'extérieur, dont l'orientation se situe dans l'intervalle du parcours du soleil au solstice d'hiver (120° à l'est et 240° à l'ouest),

⁸⁴ Limites maximales du volume d'une construction permettant d'assurer l'accès direct du soleil des bâtiments voisins durant les périodes d'ensoleillement.

qui correspond à l'intervalle entre les angles 210° à l'est et 330° à l'ouest, selon les vecteurs d'orientation de Revit (figure 77). Ce script suit l'enchaînement :

```

Sélectionner la liste des pièces dont le paramètre d'ensevelissement == Oui ;
Pour chaque pièce ;
    Sélectionner la liste des fenêtres et les fonctions des murs hôtes correspondants ;
finPour ;
Pour chaque fenêtre dont fonction de mur hôte == Extérieur ;
    Sélectionner le vecteur d'orientation ;
finPour ;
Déterminer l'intervalle du parcours du soleil au solstice d'hiver en Tunisie ;
[210°-330°] ;
Si 210° ≤ vecteur d'orientation ≤ 330° ;
    Alors visualiser la pièce en vert ;
    Sinon visualiser la pièce en rouge ;
finSi ;

```

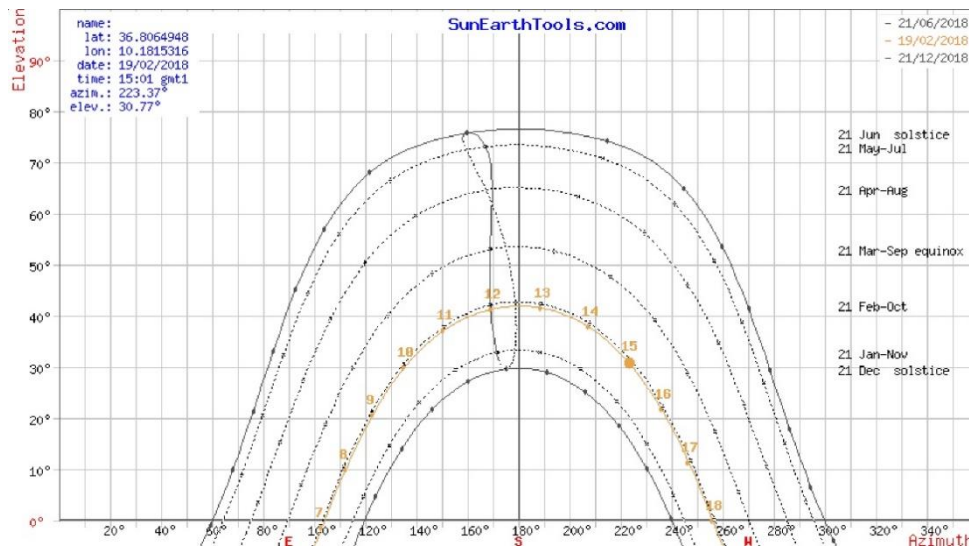


Figure 76 Trajectoires du soleil au solstice d'hiver en Tunisie (<https://www.sunearthtools.com>)

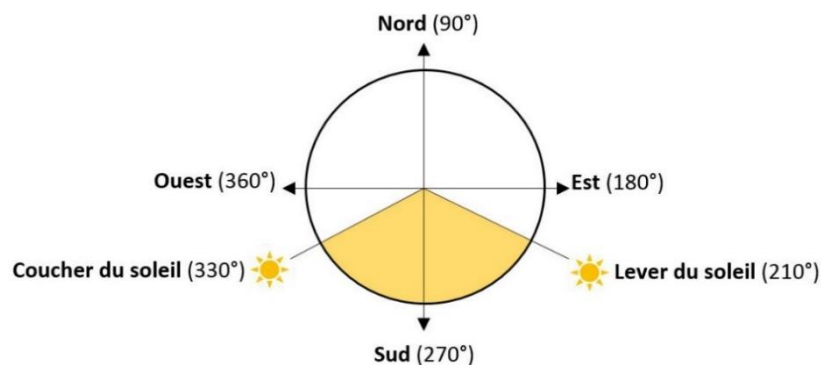


Figure 77 Angles du levé/couché du soleil au solstice d'hiver en Tunisie, selon les vecteurs d'orientation de Revit.

L'exécution de ce script permet au concepteur de détecter, en un seul clic, les pièces qui ne respectent pas l'exigence d'enseillement. Après, il pourra décider de revoir ou de maintenir son modèle selon son parti architectural. La figure 78 montre un exemple de visualisation avant et après l'exécution du script de vérification de l'enseillement des pièces. Dans cet exemple, l'enseillement est exigé pour le salon, la SAM, le séjour et la cuisine. Après exécution du script la visualisation montre que l'exigence est respectée pour les trois premières pièces, mais qu'elle n'est pas respectée pour la cuisine. Ici par exemple, étant donné que l'exigence d'enseillement est respectée pour les pièces de vie, le concepteur (moi-même) a choisi d'accepter sa conception et d'ignorer l'enseillement de la cuisine en faveur des pièces de vie (salon, SAM et séjour). Il a ainsi réinitialisé la vue pour continuer à concevoir.

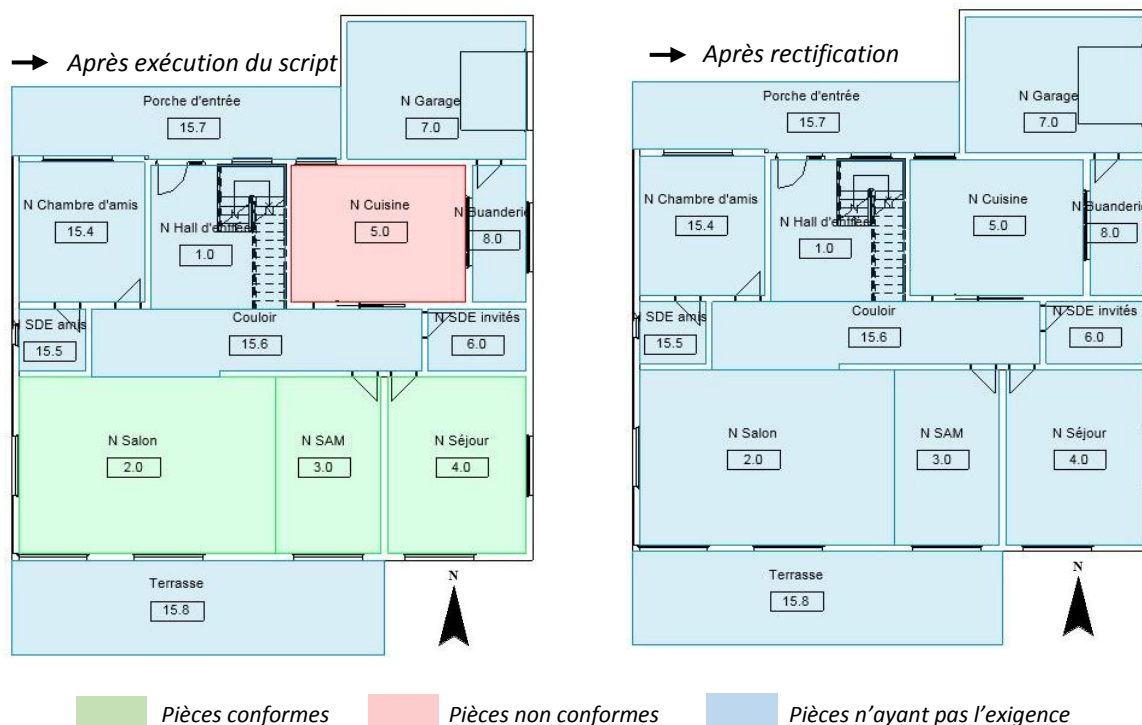


Figure 78 Captures d'écran Revit après exécution du script de vérification de l'enseillement

7.4.5 Vérification de la distribution verticale des pièces

➤ Règle

L'exigence qui porte sur la distribution verticale des pièces précise si une ou plusieurs pièces doivent être distribuées verticalement à partir d'une pièce donnée. Pour vérifier cette exigence, il s'agit en d'autres termes de vérifier si les pièces de distribution et celles desservies n'appartiennent pas au même niveau (ou étage).

➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

Le script de vérification de cette exigence suit l'enchaînement suivant :

```
Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être desservies verticalement ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner le niveau (1) auquel elle appartient ;  
finPour ;  
Sélectionner la liste des pièces à travers lesquelles doit se faire la distribution ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner le niveau (2) auquel elle appartient ;  
finPour ;  
Si niveau (1) == niveau (2) ;  
    Alors visualiser la pièce en vert ;  
    Sinon visualiser la pièce en rouge ;  
finSi ;
```

L'exécution du présent script visualise les pièces du modèle BIM selon leur conformité à l'exigence. Dans le cas d'une pièce non conforme (visualisée en rouge), le concepteur doit consulter le sous-type d'espace <Space-SubType> à partir duquel doit se faire cette distribution dans la liste des contraintes de la pièce, pour revoir sa conception en fonction. La figure 79 montre un exemple d'exécution de ce script. Dans cet exemple, la chambre des parents <Space-SubType> possède l'exigence d'être verticalement distribuée à partir de l'entrée principale <Space-SubType>.

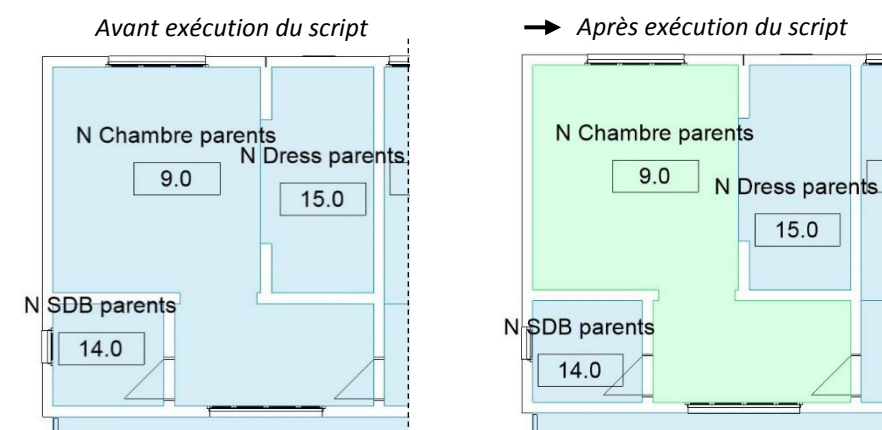


Figure 79 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la distribution verticale.

7.4.6 Vérification de la distribution horizontale des pièces

Conformément à l'enchaînement de la vérification de la distribution verticale des pièces. Le script de vérification de la distribution horizontale permet de mettre en évidence les pièces ayant cette exigence, qui n'appartiennent pas au même niveau. Ce script repose sur l'enchaînement suivant :

```
Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être desservies horizontalement ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner le niveau (1) auquel elle appartient ;  
finPour ;  
Sélectionner la liste des pièces à travers lesquelles doit se faire la distribution ;  
Pour chaque pièce  
    Sélectionner le niveau (2) auquel elle appartient ;  
finPour ;  
Si niveau (1) == niveau (2) ;  
    Alors visualiser la pièce en vert ;  
    Sinon visualiser la pièce en rouge ;  
finSi ;
```

7.4.7 Vérification de l'accès direct d'une pièce depuis une autre

➤ Règle

Pour que deux pièces soient en relation directe, ou que l'une soit accessible à travers l'autre, deux possibilités se présentent. Elles doivent être soit totalement ouvertes l'une sur l'autre, soit séparées, mais gardant un point d'accès partagé (une ouverture de passage ou une porte) (figure 80).

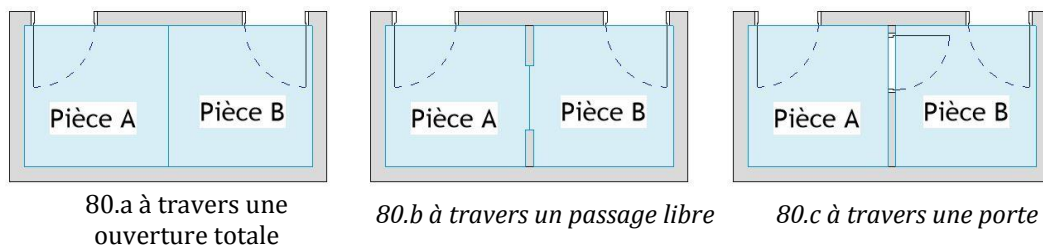


Figure 80 Exemples simplifiés des différents cas d'accès direct entre deux pièces.

➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

La démarche de vérification de l'accessibilité des pièces repose sur la dernière condition de la règle de vérification (figure 80.c). Ce choix est dû aux limites de la version actuelle de l'outil de programmation visuelle Dynamo, qui ne permet de sélectionner ni la liste des séparateurs de pièces (figure 80.a) ni celle des ouvertures libres (figure 80.b) d'une pièce donnée. Pour cela, nous nous sommes limités à la vérification de l'accès à travers une porte commune. Le script de vérification de l'accès direct d'une pièce depuis une autre suit l'enchaînement suivant :

```
Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être en relation ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner la liste des points d'accès (1);  
finPour ;  
Sélectionner la liste des pièces avec lesquelles doit se faire l'accès ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner la liste des points d'accès (2);  
finPour ;  
Si la liste des points d'accès (1) et (2) ont un élément en commun ;  
    Alors visualiser les pièces en vert (les deux pièces en relation ainsi que celle intermédiaire) ;  
    Sinon visualiser les pièces en rouge ;  
finSi ;
```

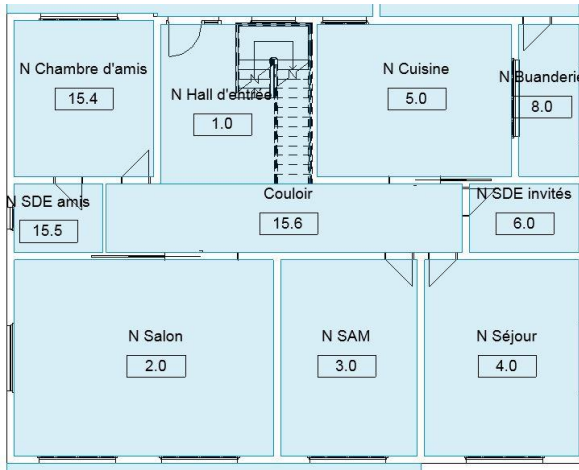
La figure 81 montre un exemple d'exécution du script de vérification de l'accessibilité des pièces. Dans cet exemple, la salle à manger doit être accessible depuis le salon. Après vérification et détection du problème, le concepteur a rectifié sa conception en ajoutant une porte coulissante entre les deux pièces.

7.4.8 Vérification de la relation entre les pièces

➤ Règle

Pour que deux pièces soient en relation, elles doivent être soit en relation directe (1^{er} cas, figure 82), soit en relation indirecte et reliées à travers une ou plusieurs autres pièces (2^{ème} cas, figure 82). Cependant, dans un modèle BIM, toutes les pièces peuvent être considérées en relation d'une façon ou d'une autre, puisqu'il existe toujours des dégagements et des pièces de transition qui assurent une circulation fluide dans l'ensemble du projet. Ainsi, il est nécessaire de définir une limite de nombre de pièces intermédiaires, au-delà de laquelle les pièces ne sont plus considérées en relation.

Avant exécution du script



Légende :

Pièces conformes



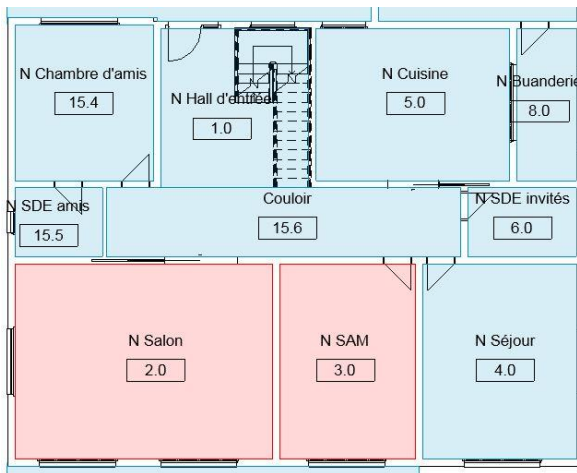
Pièces non conformes



Pièces n'ayant pas l'exigence



→ Après exécution



→ Après rectification

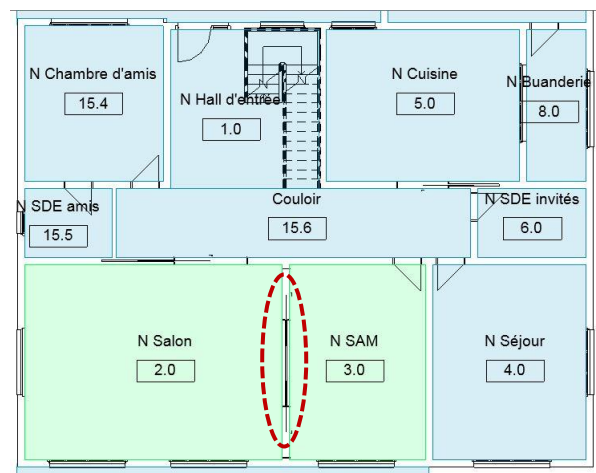


Figure 81 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de l'accessibilité des pièces

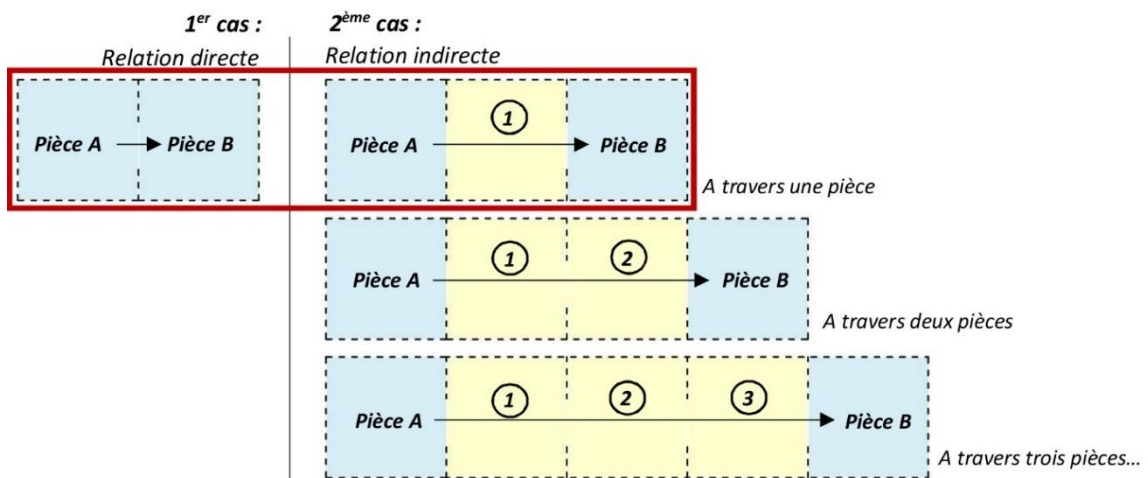


Figure 82 Les possibilités de relation entre deux pièces prises en compte au niveau de ce travail

➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

Au niveau de ce travail, et afin de diminuer au maximum la complexité des scripts, cette limite est fixée à une seule pièce intermédiaire. La récurrence de l'enchaînement de vérification proposé dans le même script permettra ensuite de vérifier autant de pièces intermédiaires que nécessaire. Pour vérifier la relation entre deux pièces, l'enchaînement proposé à ce niveau prend en compte ainsi les deux premières possibilités de relation entre deux pièces (figure 82), à savoir : la relation directe et celle indirecte à une pièce intermédiaire. Le script de vérification de la relation entre les pièces suit la démarche suivante :

```
Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être en relation ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner la liste des points d'accès (1);  
finPour ;  
Sélectionner la liste des pièces avec lesquelles doit se faire la relation ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner la liste des points d'accès (2);  
finPour ;  
Pour chaque point d'accès (1) ;  
    Sélectionner la liste des pièces intermédiaires accessibles à travers;  
finPour ;  
Pour chaque pièce intermédiaire ;  
    Sélectionner la liste des points d'accès (3) ;  
finPour ;  
Si la liste des points d'accès (1) et (2) ont un élément en commun ;  
Ou ;  
Si la liste des points d'accès (1) et (3) ont un élément en commun  
Et ;  
Si la liste des points d'accès (3) et (2) ont un élément en commun  
    Alors visualiser les pièces en vert (les pièces en relation ainsi que celle intermédiaire) ;  
    Sinon visualiser les deux pièces en rouge ;  
finSi ;  
finSi ;
```

La figure 83 montre un exemple avant et après l'exécution du présent script. Dans cet exemple, le garage doit être en relation avec la cuisine.

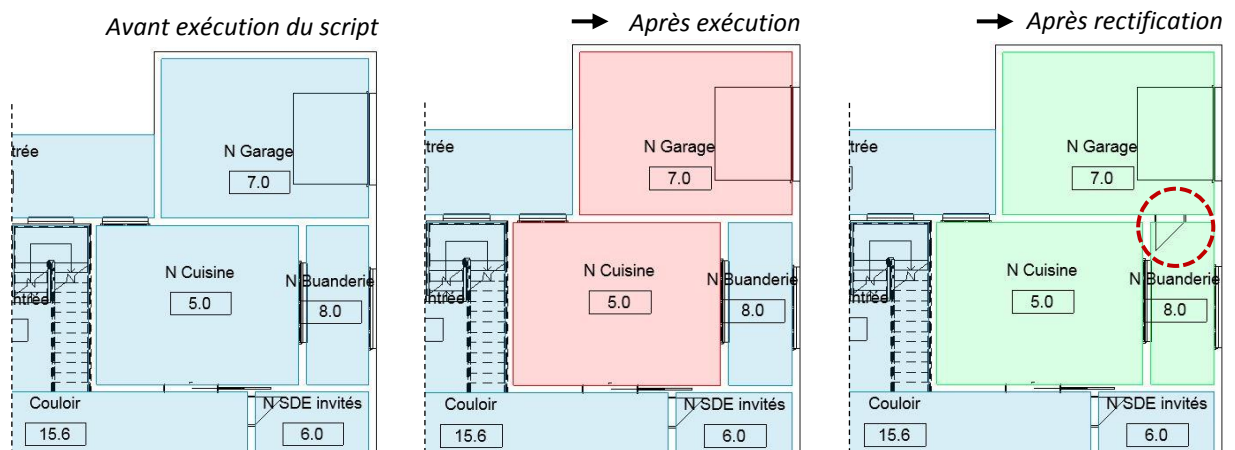


Figure 83 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la relation entre les pièces.

7.4.9 Vérification de la contiguïté des pièces

➤ Règle

Deux pièces sont considérées contiguës quand elles sont adjacentes, partageant un mur mitoyen qui les sépare. Or, dans un modèle BIM, deux pièces A et B peuvent être délimitées par un même mur sans pour autant être contiguës (figure 84.a et 84.b). Pour vérifier la contiguïté de deux pièces, nous avons opté pour la vérification de la présence d'au moins deux murs en commun qui soient perpendiculaires (Figure 84.c).

➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

Le script de vérification de la contiguïté des pièces repose sur l'enchaînement suivant :

Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être contiguës à d'autres ;

Pour chaque pièce ;

Sélectionner la liste des murs délimitant (1);

finPour ;

Sélectionner la liste des pièces auxquelles elles doivent être contiguës ;

Pour chaque pièce ;

Sélectionner la liste des murs délimitant (2) ;

finPour ;

Si les listes des murs délimitant (1) et (2) ont deux éléments en commun ;

Alors sélectionner le vecteur de chaque mur ;

Et ;

Si vecteur (1) est orthogonal à vecteur (2) ;

Alors visualiser les deux pièces en vert ;

Sinon visualiser les deux pièces en rouge ;

finSi ;

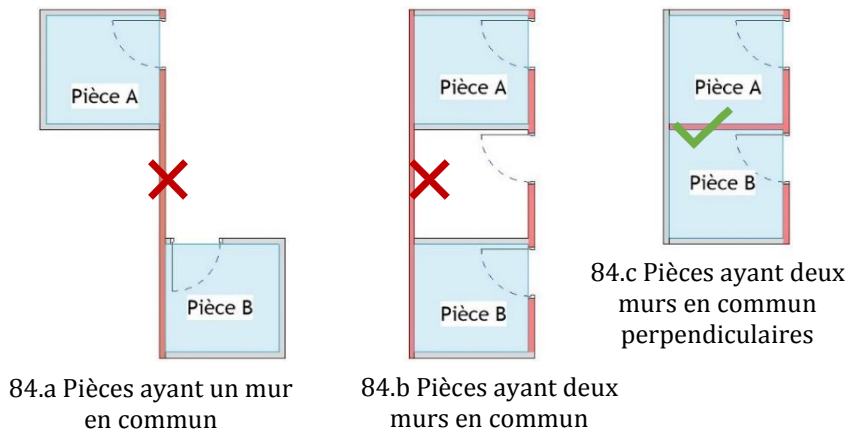


Figure 84 Exemples simplifiés de cas de deux pièces ayant un mur en commun

La figure 85 montre un exemple avant et après l'exécution du script de vérification de la contiguïté des pièces. Dans cet exemple, les deux chambres enfants doivent être contiguës. Après exécution du script de vérification et détection du problème, le concepteur a changé la disposition de l'une des chambres enfants de façon à être contiguës.

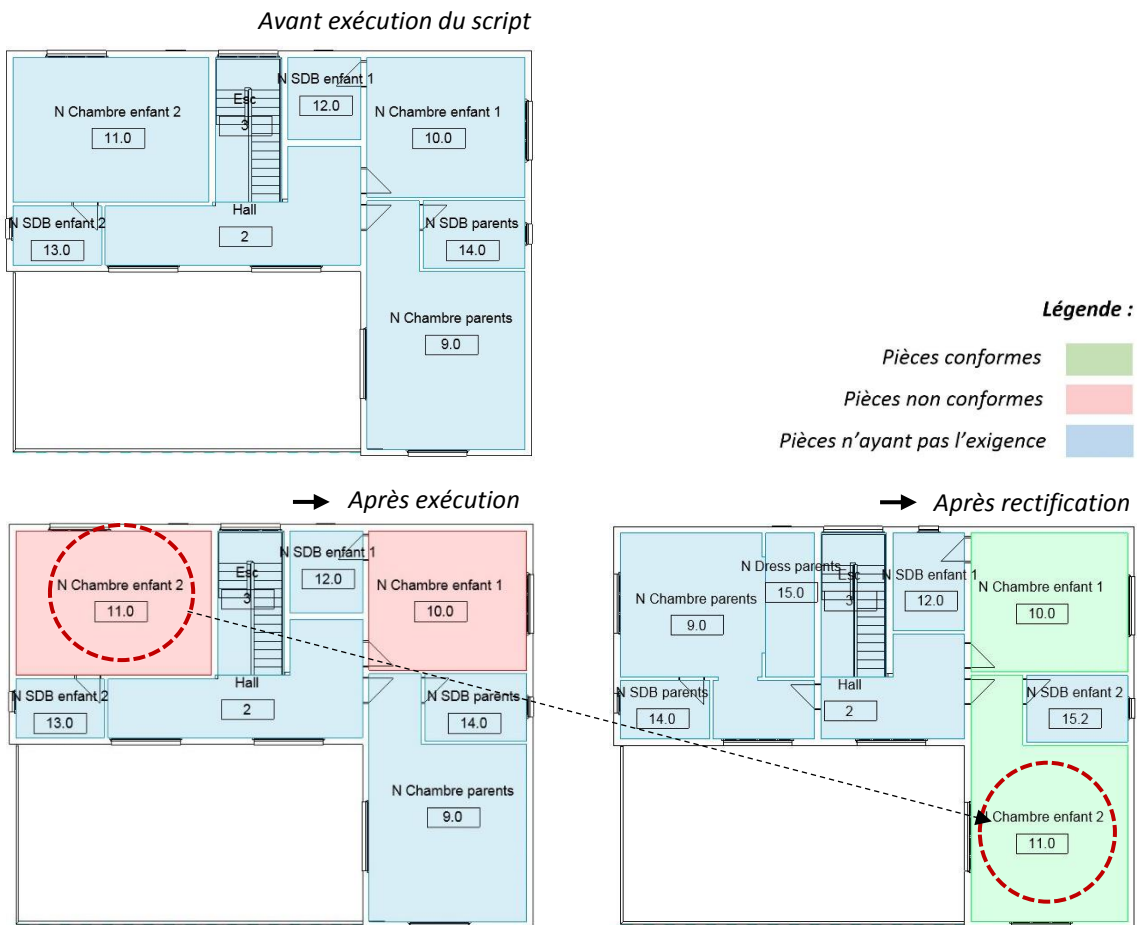


Figure 85 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la contiguïté des pièces.

7.4.10 Vérification de la proximité des pièces

La notion de proximité ne fait pas seulement appel à la perception d'une distance liée à l'usage, mais plutôt à l'intuition de l'ensemble des relations possibles entre deux pièces (Corinne Boddaert, 2001). Elle varie selon l'échelle des pièces en question, mais aussi selon leur usage habituel. Par exemple, pour que deux pièces soient à proximité, la distance maximale à parcourir exigée dans un centre hospitalo-universitaire peut être de 20 mètres. Alors qu'elle peut être de 3 mètres dans un petit studio.

➤ Règle

Pour vérifier la proximité des pièces, il est nécessaire de définir une distance maximale, au-delà de laquelle les pièces ne sont plus considérées proches. Cette distance est calculée entre les points d'accès des pièces et est fixée au niveau de cette étude à 5 mètres pouvant être modifiée dans le script à partir d'un curseur.

➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

Dans notre démarche, la distance maximale de proximité⁸⁵ est prédéfinie dans le script de vérification de la proximité des pièces à l'aide d'un curseur qui permet au concepteur de la faire varier selon le besoin. Le script de vérification de la proximité des pièces repose sur l'enchaînement suivant :

Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être à proximité d'autres pièces ;
Pour chaque pièce ;
Sélectionner la localisation des portes ;
finPour ;
Sélectionner la liste des pièces auxquelles elles doivent être proches ;
Pour chaque pièce ;
Sélectionner la localisation des portes ;
finPour ;
Calculer la distance entre les localisations des portes ;
Si distance ≤ valeur prédéfinie ;
Alors visualiser les deux pièces en vert ;
Sinon visualiser les deux pièces en rouge ;
finSi ;

⁸⁵ Ce paramètre n'est pas pris en compte dans le tableau des exigences (Excel) puisqu'il n'a pas été détecté comme paramètre répétitif dans les documents de programmation architecturale analysés (chapitre3). Il a été constaté au niveau de ce travail d'analyse que la proximité des pièces est exigée dans la plupart des cas sans désignation de distance maximale, laissant libre cours à l'interprétation du concepteur. Cependant, pour veiller au respect des exigences spatiales, il est nécessaire de bien préciser leurs paramètres au niveau de l'étude de programmation.

La figure 86 montre un exemple avant et après l'exécution du script de vérification de la contiguïté des pièces. Dans cet exemple, le séjour doit être à proximité de la cuisine et la salle d'eau doit être à proximité de la salle à manger.

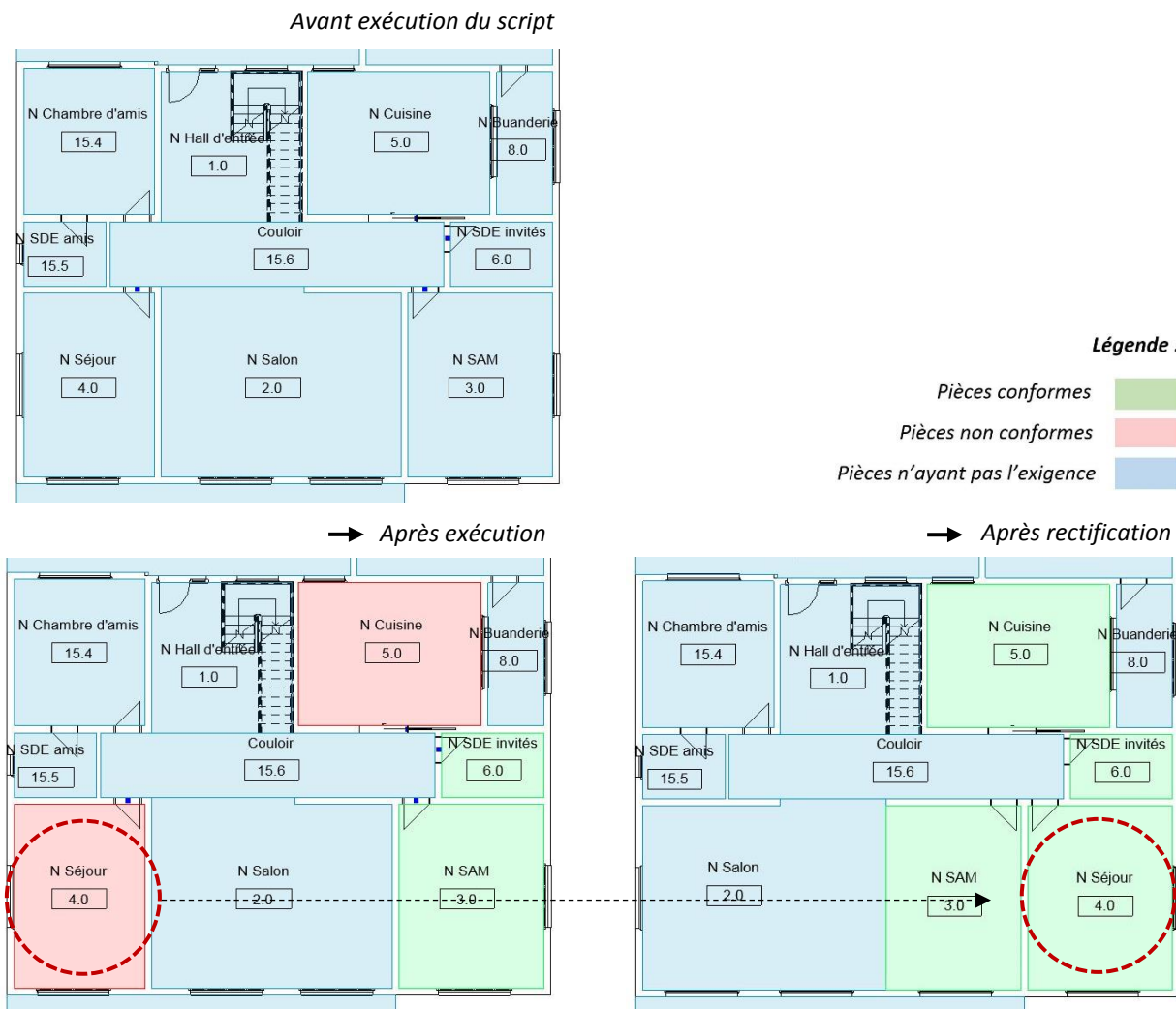


Figure 86 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la proximité des pièces.

7.4.11 Vérification des surfaces des pièces

En plus de la vérification de cet ensemble d'exigences qualitatives, nous avons prévu également un script de vérification des surfaces prévues. Ce script a pour objectif d'assister le concepteur à avancer sur la mise en forme des pièces pour pouvoir aboutir plus rapidement aux exigences d'ordre qualitatif.

➤ Règle

Pour vérifier la conformité de la surface des pièces, la surface de la pièce conçue doit être plus ou moins égale à la surface prévue par le programme, moyennant une marge d'acceptabilité. Au niveau de ce travail cette marge est fixée à 12% (marge communément utilisée dans le domaine du bâtiment dans le calcul des surfaces pour des fins de vérification ou de calcul de métré).

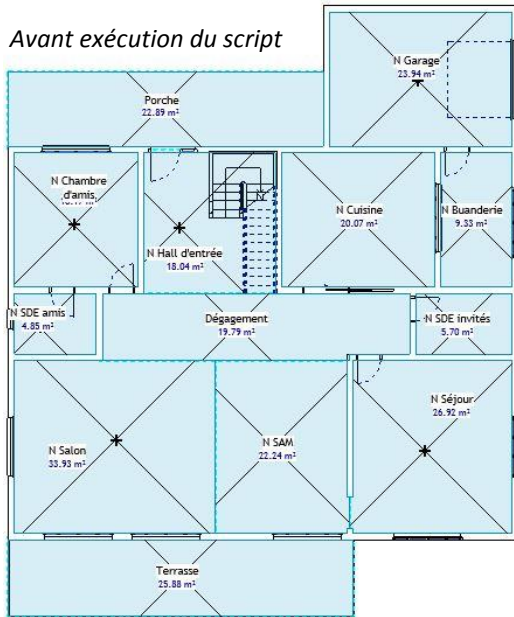
➤ Démarche de vérification et création du script Dynamo

Ce script ne commence pas par la sélection des pièces ayant l'exigence comme tous les scripts précédents, il est applicable à toutes les pièces demandées par le programme (en dehors des pièces ajoutées par le concepteur comme les halls, dégagements, balcons, etc.). Il s'agit de l'enchaînement suivant :

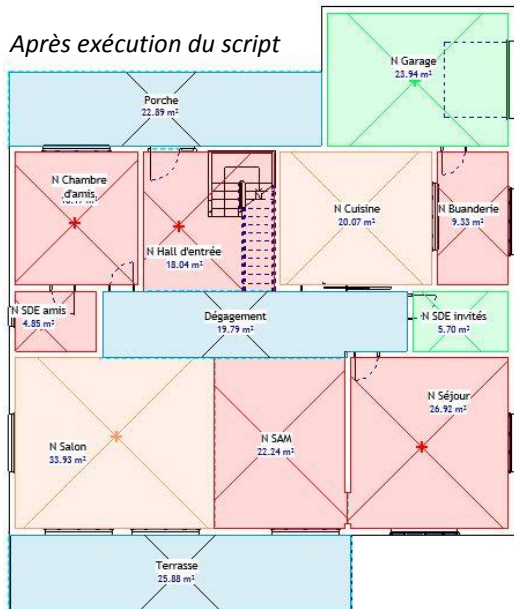
```
Sélectionner la liste des pièces demandées par le programme ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner la surface prévue ;  
finPour ;  
Sélectionner la liste des pièces conçues ;  
Pour chaque pièce ;  
    Sélectionner la surface ;  
finPour ;  
Si surface conçue est supérieure à celle prévue ( $\pm 12\%$ ) ;  
    Alors visualiser la pièce en rouge ;  
    Sinon visualiser la pièce en vert ;  
finSi ;  
Si la surface conçue est inférieure à la surface prévue ( $\pm 12\%$ ) ;  
    Alors visualiser la pièce en rouge clair ;  
finSi ;
```

Le concepteur peut exécuter ce script autant de fois que nécessaire et revoir sa conception conformément aux indications graphiques pour se rapprocher au mieux des surfaces demandées. Un exemple d'exécution est montré dans la figure 87.

Avant exécution du script



Après exécution du script



Exécution après rectification

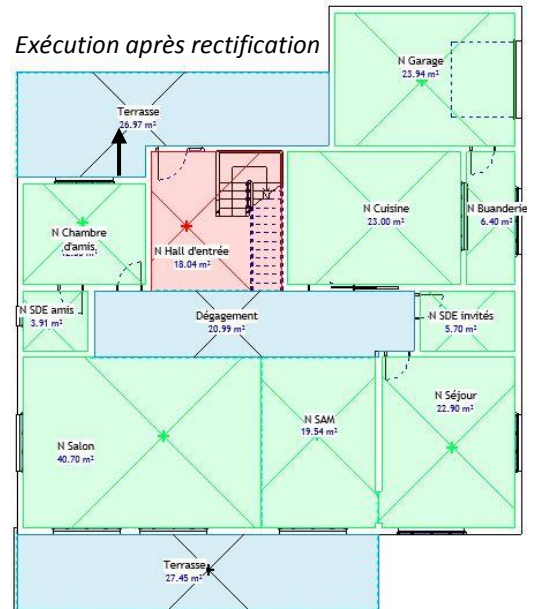


Figure 87 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification des surfaces des pièces.

7.5 Bilan

Dans ce chapitre, une approche globale permettant de prendre en compte les ESQ_L dans l'outil Revit a été présentée. Pour la mise en œuvre de cette démarche et sur la base du modèle d'espace spécifié au niveau du chapitre précédent, un prototype a été développé. Ce prototype permet d'intégrer les ESQ_L dans Revit et de vérifier par la suite la conformité des modèles BIM conçus en fonction de ces exigences.

La première partie de l'approche consiste d'abord à la préparation d'un document numérique pré-rempli, dans lequel le programmiste doit définir les exigences spatiales du programme, essentiellement celles d'ordre qualitatif. Il s'agit d'un tableau Microsoft Excel qui structure toutes les exigences spatiales et leurs descriptions selon les diagrammes de répartition des exigences déduites à la fin du troisième chapitre. Cette première partie de l'approche proposée concerne le programmiste dans la saisie des exigences, une étape qui doit se faire en phase amont de la conception. Elle est ainsi dédiée à la phase de programmation architecturale.

La seconde partie de l'approche développée concerne le concepteur dans les premières étapes de la phase de conception architecturale. Elle lui permet d'intégrer les ESQ_L dans l'outil BIM pour commencer à concevoir. À cet effet, un ensemble de scripts ont été développés en utilisant le logiciel de programmation visuelle Dynamo. Ces scripts permettent d'extraire les paramètres d'exigences spatiales et leurs valeurs du tableau des exigences (Excel) et de les ajouter ensuite à la plateforme de Revit dans la liste des contraintes des pièces.

La troisième partie de notre approche consiste à permettre au concepteur de vérifier si le modèle conçu est conforme aux exigences spatiales requises. Elle concerne ainsi toutes les étapes de la conception architecturale et est basée sur une simple comparaison entre les propriétés des pièces conçues et leurs paramètres d'exigences (désormais ajoutées à la plateforme de Revit). Cela permet de détecter les problèmes de non-conformité pour les mettre en évidence graphiquement, dans la vue active de Revit, à travers une visualisation en couleur selon le problème détecté. Pour cela, une dizaine de scripts de vérification ont été développés. Chaque script concerne un paramètre d'exigence spécifique.

Nous nous sommes concentrés au niveau de ce travail de développement sur les exigences qualitatives les plus décrites dans les documents de programmation, qui sont à la base de notre problématique de recherche. Ainsi, l'approche que nous avons proposée ne représente pas une solution de vérification de toutes les exigences. Mais plus tôt, une piste de développement vers

une meilleure prise en compte et une maîtrise des ESQ_L en phase de conception tout en restant dans l'outil BIM.

L'approche de conception proposée au niveau de ce chapitre doit à présent être évaluée à travers un protocole expérimental de validation, en la comparant à l'approche classique (habituelle) de conception. L'interprétation des résultats des deux expériences et le calcul de l'écart en matière de respect des ESQ_L, mais aussi en matière de gain de temps de conception permettra ainsi de conclure sur l'apport de cette approche guidée par le modèle d'espace spécifié.

QUATRIEME PARTIE :

ÉVALUATION DE L'APPROCHE DE CONCEPTION PROPOSÉE

Cette dernière partie est consacrée à l'évaluation de l'approche de conception que nous avons proposée au niveau de la troisième partie. Le travail d'évaluation s'est déroulé sur deux étapes. La première étape porte sur l'expérimentation de cette approche dans un milieu pédagogique, en la comparant à l'approche classique de conception (approche habituellement suivie par les concepteurs dans les pratiques BIM courantes). L'observation des résultats des deux expériences en matière de respect des ESQ_L et en matière de gain de temps permet d'évaluer les hypothèses de ce travail de recherche.

La deuxième étape concerne l'inspection du travail d'expérimentation qui permet non seulement de s'assurer du bon déroulement des expériences suivant la démarche fonctionnelle prévue et dans le respect du protocole expérimental défini, mais également de porter un œil critique sur cette démarche fonctionnelle ainsi que sur le modèle d'espace spécifié. Ce travail d'inspection constitue une première étape de validation de l'approche de conception proposée face aux résultats obtenus. Les limites et les critiques soulevées seront suivies de certaines pistes d'amélioration pouvant mener à la validation de notre approche.

CHAPITRE 8 :

EXPERIMENTATION DE L'APPROCHE DEVELOPEE

L'objectif de ce chapitre est de confronter l'évolution d'un projet architectural réalisé en suivant l'approche de conception proposée dans le chapitre précédent, à celle réalisée en suivant l'approche de conception classique utilisant l'outil de CAO Revit. L'expérimentation comparative des deux approches sur un même projet permet de mesurer l'impact de notre approche sur la réalisation d'un projet et constitue ainsi une première étape dans l'évaluation de la pertinence de l'approche proposée.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord le protocole expérimental adopté. Ce protocole définit le cadre général de l'expérimentation et détermine la méthode de suivi et la méthode de collecte des données. Il définit également les variables à analyser et la méthode d'analyse et d'interprétation des résultats. Ce chapitre expose ensuite les modalités de réalisation de l'expérimentation et présente enfin le travail d'analyse des données et d'interprétation des résultats comparés des deux expériences.

8.1 Présentation du protocole expérimental

8.1.1 Définition du cadre général des expériences

Compte tenu des objectifs fixés, la constitution des deux groupes d'étudiants réalisant les expériences doit être analogue. Ce doit être deux groupes de concepteurs ayant presque les mêmes compétences en matière de proposition d'une réponse architecturale et un même niveau de maîtrise de l'outil Revit. Les participants des deux groupes travaillent individuellement sur un même programme architectural durant une même période. L'un expérimente le prototype développé et l'autre travaille avec la démarche classique de conception afin d'évaluer l'apport de l'approche proposée au travers du prototype mis en œuvre dans Revit vis-à-vis de la réponse architecturale produite.

Pour cela, nous avons envisagé de faire l'expérimentation dans un cadre pédagogique⁸⁶ avec deux groupes d'étudiants en troisième année architecture à l'école nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis (ENAU) dans le cadre du cours d'informatique, dans lequel ils reçoivent une initiation à l'utilisation de Revit. Pour s'assurer de la validité des acquis en matière de maîtrise de l'outil, il a été convenu, en collaboration avec l'enseignante responsable du cours, d'organiser l'expérimentation en parallèle avec le dernier exercice d'évaluation. Les séances d'expérimentation sont programmées en parallèle avec les séances du cours d'informatique⁸⁷ afin de leur donner le cadre de situations réelles d'évaluation qui rentrent dans un cadre horaire sérieux et régulier (une heure cinquante minutes).

8.1.2 Procédure de sélection des participants

Pour la sélection des participants, nous sommes partis de deux groupes de 30 étudiants, ayant des niveaux de compétences plus ou moins variés sur l'utilisation de l'outil Revit (figure 88). Ensuite, une sélection des participants a permis de réduire le nombre d'étudiants pour constituer deux groupes expérimentaux analogues en termes de compétences. Pour ce faire, un test de

⁸⁶ Le cadre pédagogique peut offrir deux groupes de participants pour travailler différemment sur un même projet. La possibilité d'envisager cette expérimentation dans un milieu professionnel a été abandonnée, car elle nécessite l'engagement d'un nombre considérable de concepteurs dans un processus de conception qui peut être considéré relativement long, puisqu'il implique l'essai d'une nouvelle approche de conception.

⁸⁷ Les deux groupes ont le cours d'informatique vendredi matin, le premier groupe de 8h30 à 10h20 et le deuxième de 10h40 à 12h30. Ainsi, on s'est organisé de façon à avoir par alternance, le deuxième groupe le matin (de 8h30 à 10h20). Ensuite, le premier à partir de 10h45.

niveau a été effectué pour repérer les cinq premiers étudiants de chaque groupe et les inciter à participer à l'expérimentation pour avoir une note d'appréciation en informatique. Il s'agit d'un exercice court de la durée d'une séance qui porte sur la conception d'un studio étudiant d'une surface de 12m². Ce studio doit fournir à l'étudiant un cadre propice au travail, à la distraction et au repos. Il doit lui offrir ainsi, un espace pour travailler, un espace pour dormir, un autre pour avoir de la visite, une salle d'eau, une kitchenette et un dressing (annexe 7). Le suivi de cet exercice a permis d'évaluer la capacité des étudiants à répondre à un programme architectural en utilisant Revit. Il nous a également guidé dans la définition du programme architectural pour l'exercice de l'expérimentation et d'en envisager la durée. Des extraits des résultats de ce test de niveau sont montrés dans l'annexe 8.

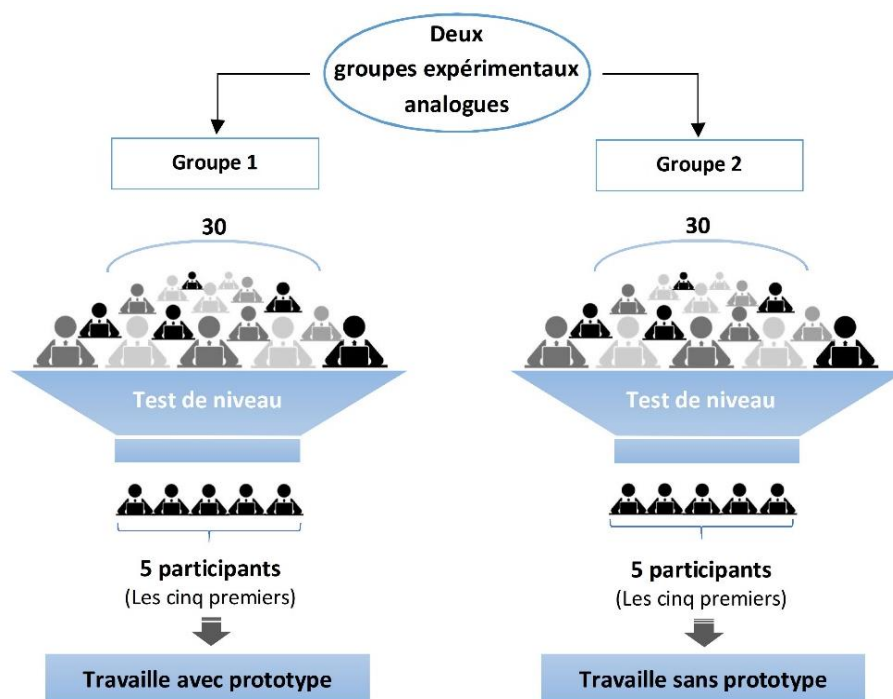


Figure 88 Procédure de sélection des participants

8.1.3 Définition du programme architectural

Plusieurs critères influencent la définition du programme architectural sujet des expériences. Parmi ces critères, les contraintes temps et matériel sont essentielles. En effet, la collecte des données est à effectuer par capture vidéo d'écran et le travail de conception de chaque étudiant doit être enregistré pour être ensuite analysé. Ainsi, le volume des séquences vidéo qui en résulte dépend de l'ampleur du sujet en question. Vu, la limite du matériel informatique mis à disposition et vu la limite de la durée allouée au travail d'expérimentation dans le cadre d'un travail de

recherche en thèse, il est utile de diminuer le nombre des séances. Dagnelie⁸⁸ stipule que, dans un travail expérimental « ... le problème est en fait un problème d'équilibre entre les objectifs que l'expérimentateur souhaiterait atteindre et les moyens dont il dispose... » (Dagnelie, 2012)⁸⁹.

Nous nous sommes limités ainsi à un exercice qui s'étale sur cinq séances (de 1h50 chacune). Il s'agit de la conception d'une villa de maître d'environ 300 m² de surface couverte, sur un terrain de 500m². En plus des contraintes quantitatives d'ordre géométrique et réglementaire, le programme architectural est défini de façon à contenir le maximum possible des ESQ_L spécifiées par notre modèle d'espace (annexe 9) et spécifiquement celles pour lesquelles nous avons pu développer des scripts de vérification. Ce programme inclut entre autres, des exigences de topologie décrivant la disposition des pièces (ex. la proximité et la contiguïté), leur relation et leur distribution. Il inclut également des exigences d'accessibilité et de confort (portant sur l'éclairage naturel, l'ensoleillement et la ventilation naturelle des pièces).

8.1.4 Méthodes de suivi et de collecte des données

Pour assurer le bon déroulement de l'expérimentation, un certain nombre de règles a été défini et expliqué aux participants au préalable. Ces règles concernent la durée et les conditions de déroulement des expériences. La durée est fixée à quatre séances, durant lesquelles le travail doit se dérouler uniquement en classe et jamais en dehors des séances prévues à cet effet. Une séance préliminaire précédera l'expérimentation. Elle sera consacrée à la lecture et à l'explication du programme et de l'ensemble des exigences demandées, pour les deux groupes. Durant cette séance préliminaire, les participants des deux groupes reçoivent le programme architectural en format papier, ils procèdent au dessin du terrain et à la prise en compte des contraintes réglementaires (COS⁹⁰, retrait par rapport aux limites du terrain, etc.). Durant cette même séance, le groupe qui travaille avec le prototype reçoit en plus une explication concernant le contexte de l'expérimentation et ses principaux objectifs, suivie d'une présentation du prototype à utiliser et de ses principales fonctionnalités avec une démonstration d'un cas d'application. Le programme architectural distribué doit être ramassé à la fin de la séance préliminaire.

⁸⁸ Pierre Dagnelie, professeur de la faculté des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique. Lauréat du prix du statisticien d'expression française et membre honoraire de la Société Royale de Statistique de Grande-Bretagne.

⁸⁹ Bien qu'appartenant à un autre domaine de recherche, cet ouvrage détaille avec précision les différents principes d'un travail d'expérimentation allant des procédures de planification des expériences jusqu'à l'analyse des résultats.

⁹⁰ Coefficient d'occupation au sol

Les quatre séances qui suivent font l'objet du travail d'observation et d'analyse, durant lesquelles les étudiants des deux groupes (groupe 1 : avec prototype / groupe 2 : sans prototype) procèdent à la conception architecturale, depuis les premières esquisses jusqu'à la préparation du rendu final. Durant ces quatre séances (tableau 15), le programme architectural est fourni uniquement en format PDF, afin de pouvoir observer ensuite le comportement des étudiants vis-à-vis de sa consultation. Le travail de chaque étudiant est enregistré par capture vidéo d'écran tout au long de chaque séance à l'aide du logiciel Camtasia Studio⁹¹. Les enregistrements sont récupérés à la fin de chaque séance et sont classés par étudiant, par séance et par groupe pour le travail d'encodage. Conformément à l'approche de conception proposée, le premier groupe (avec prototype) reçoit en plus du programme architectural les fichiers du prototype incluant l'ensemble des scripts Dynamo développés au niveau du chapitre 7, accompagnés du tableau des exigences (Excel) synthétisant les contraintes du programme. Ce tableau a été rempli à l'avance (je joue dans l'expérimentation le rôle du programmiste).

	Groupe 1 Avec prototype	Groupe 2 Sans prototype
Séance préliminaire	Programme (format papier)	Programme (format papier)
Séances 1 à 4	Programme (PDF)	Programme (PDF) Tableau des exigences (Excel) Scripts développés (Dynamo)

Tableau 15 Documents fournis par groupe

8.1.5 Détermination des variables à analyser

Conformément aux hypothèses formulées au niveau de cette étude et aux ESQ_L demandées par le programme, nous nous intéressons dans cette phase à l'observation de deux facteurs, à savoir la quantité d'exigences respectées et le temps dépensé à la consultation du programme. Concernant le facteur de quantité d'exigences respectées, les variables prises en considération concernent :

- la moyenne des exigences respectées par groupe. Cette variable nous permet en premier lieu de vérifier s'il y a effectivement une différence entre les deux expériences en matière de respect des ESQ_L. Ainsi, nous pouvons valider ou rejeter la première hypothèse de ce travail de recherche qui stipule que : « *La prise en compte des ESQ_L dans l'outil BIM et la vérification*

⁹¹ <https://www.techsmith.fr/camtasia.html>

de la conformité de la conception à ces exigences peuvent assister les concepteurs à produire des modèles BIM plus conformes aux exigences du programme »,

- la moyenne des exigences respectées par groupe par séance. Cette variable permet par la suite d'observer l'évolution de la conception de chaque groupe pour pouvoir appréhender le comportement des concepteurs, au fur et à mesure de l'avancement de la conception, et de déterminer ainsi, s'il y a une différence entre les deux démarches (avec et sans prototype).

En ce qui concerne le facteur temps, il était question au début de comparer la durée dépensée dans la consultation du programme à la durée totale de conception. Cependant, vue la taille du projet en question, ce rapport est insignifiant pour être comparé, puisque le programme peut-être appri par cœur après quelques lectures. Pour cela, nous nous sommes intéressés à l'observation des variables suivantes :

- la moyenne des consultations du programme par groupe. Cette variable permet de détecter s'il y a un écart dans le nombre de consultations. Cela nous donne au moins une idée sur le nombre de fois où les concepteurs de chaque groupe ont senti le besoin de sortir de l'outil de conception pour consulter le programme,
- la moyenne des durées des consultations par groupe par séance. Cette dernière variable a comme objectif de discerner la durée totale dépensée par chaque groupe dans la consultation du programme. La comparaison des deux durées permet de valider ou de rejeter la deuxième hypothèse de cette étude, qui stipule que : *« Cette nouvelle approche peut assister les concepteurs à optimiser le temps de conception »*.

8.1.6 Méthodes d'analyse et d'interprétation des résultats

L'interprétation des résultats consiste en une analyse de la variance des moyennes des variables des deux expériences (avec et sans prototype). Pour observer la différence des moyennes, notre méthode d'analyse se déroule en deux étapes.

La première étape concerne le traitement des données, au cours de laquelle il s'agit d'encoder les séquences vidéo enregistrées et de répertorier les résultats dans une grille (figure 89). Cette grille permet de caractériser la nature du travail des participants de chacun des deux groupes, où une ligne correspond à une séance de travail (quatre séances par participant). Verticalement, chaque colonne est associée à une variable à analyser. Cette grille est découpée en trois parties, à savoir :

- une première partie caractérise le respect des exigences quantitatives sur les pièces. Cette partie permet d'indiquer le pourcentage mesurant les pièces conçues par séance, ainsi que le pourcentage mesurant les pièces dont les surfaces prévues sont respectées, avec une colonne de synthèse de ce dernier pourcentage par participant,
- Une deuxième partie porte sur la vérification de la conformité des différentes pièces aux ESQ_L demandées. Elle est composée, à son tour, de trois parties selon les types d'exigences demandées par le programme : des exigences de confort (concernant l'éclairage naturel des pièces, l'ensoleillement et la ventilation naturelle), des exigences d'accessibilité et des exigences de topologie (proximité, contiguïté, relation et distribution verticale). Ces colonnes permettent d'indiquer si une exigence est respectée au cours d'une séance donnée (colorer en vert),
- Une troisième partie indique le nombre de consultations du programme réalisé par les différents participants ainsi que la durée passée à ces consultations.

Groupe expérimental	Séance N°	EXIGENCES QUANTITATIVES				EXIGENCES QUALITATIVES																	
		Nbe de pièces conçues en %	Surface en %	Total surfaces respectées %	Confort												Accessibilité						
					Eclairage Naturel			Ensoleillement				Ventilation naturelle					Accès direct						
					Hall d'entrée	Cuisine	Dressing CHP	Salon	SAM	Cuisine	Séjour	CHP	Buanderie	SDE invités	SDE CHP	SDE CH enfant 1	SDE CH enfant 2	SAM/Salon	SAM/cuisine				
1	41	23	88																				
2	47	12																					
3	100	47																					
4	100	6																					

Légende :

Exigences quantitatives
 Exigences qualitatives
 Exigences qualitatives respectées
 Données sur la consultation du programme

Topologie						Récapitulation		CONSULTATION PROGRAMME	
Proximité		Contiguïté	Relation	Distribution verticale		Exigences respectées par séance %	Total des exigences respectées %	Nombre de fois	Durée totale (mn)
Séjour/ Cuisine	SDE /SAM	CH enfant1/ CH enfant 2	Cuisine / Garage	Des chambres à coucher					
						5	80	0	0
						35		0	0
						30		0	0
						10		0	0

Figure 89 Extrait de la grille d'encodage, classification des variables à observer et méthode d'illustration des observations

La deuxième étape est dédiée à l'analyse et à l'interprétation de l'encodage (figure 90). Au niveau de cette étape, les résultats de chaque variable sont d'abord représentés graphiquement

dans des histogrammes pour mettre en évidence l'éventuel écart entre les deux expériences. Cet écart est ensuite vérifié par l'emploi d'un test T à variables indépendantes, à travers l'utilisation du logiciel IBM SPSS (test statistique utilisé au niveau de la section 3.4.4). Ces résultats sont ensuite interprétés sur la base des variables analysées en prenant compte des observations et des remarques notées au cours du déroulement des expériences.

Après avoir précisé les conditions générales du protocole expérimental et les méthodes de collecte et de traitement des données, le déroulement des expériences depuis la mise en route jusqu'à l'interprétation des résultats en passant par la collecte et le traitement des données est présenté dans la prochaine section.

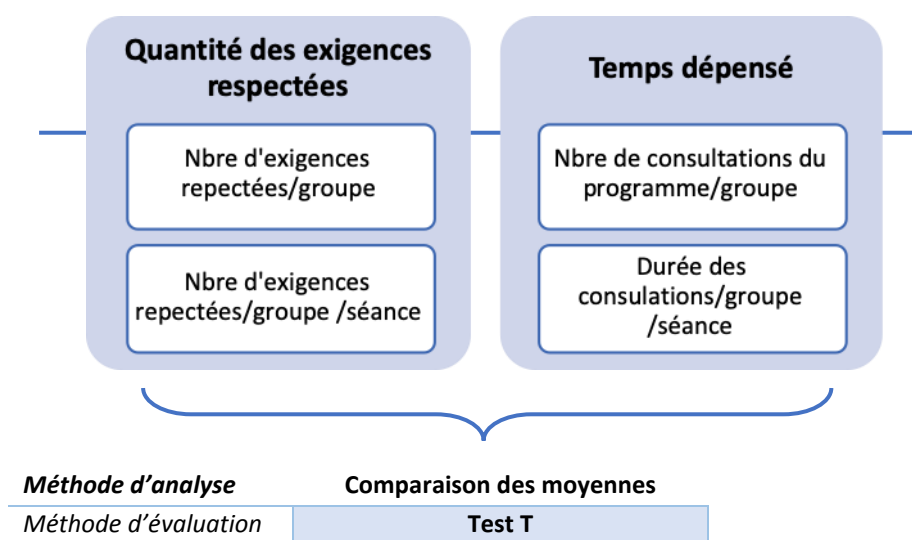


Figure 90 Méthodes d'analyse et d'interprétation des résultats

8.2 Réalisation des expériences

Afin d'assurer les mêmes conditions de travail pour les deux expériences, il est nécessaire de contrôler les facteurs extérieurs au déroulement des expériences pour ne pas influencer les résultats. Il s'agit des facteurs lieu et temps du déroulement. Pour nous prémunir de ces deux facteurs, nous avons veillé à fournir exactement les mêmes conditions pour les deux groupes. Ainsi, une même salle de classe est assurée pour les deux groupes, située loin de la cour de rassemblement des étudiants et donnant sur le jardin arrière de l'école (Salle D005). Les bruits provenant de l'extérieur sont alors minimisés pour favoriser la concentration des participants.

Étant contrôlés, les bruits à l'intérieur de la salle sont considérés comme insignifiants pour pouvoir perturber la concentration des participants.

Concernant le facteur temps, nous avons veillé au respect exact de la durée de chaque séance. Le contrôle du facteur temps est assuré à travers le logiciel de capture vidéo d'écran. Chaque participant est appelé à rendre en fin de séance une séquence de 1h50. Les éventuels retardataires reçoivent des durées supplémentaires de travail pour profiter pleinement de la séance. La perte de temps liée à l'échange entre participants est contrôlée durant le suivi. À la fin de l'expérience, les participants ayant terminé leurs rendus avant la fin de la séance sont appelés à envoyer leurs derniers enregistrements accompagnés du fichier Revit correspondant avant de quitter la salle pour ne pas perturber la concentration de leurs camarades. Le temps d'adaptation des participants à l'utilisation du prototype a été limité d'abord par la séance préliminaire de présentation et de démonstration des fonctionnalités du prototype et ensuite à travers l'accompagnement des participants pour les assister dans l'utilisation du prototype au fur et à mesure de l'avancement de la conception.

Après avoir déterminé toutes les bases du protocole expérimental, des tests d'utilisation de la démarche de conception et du prototype développé sont effectués avant le lancement des expériences. Ces tests nous ont aidés dans l'identification des étapes de la démarche qui nécessitent une intervention spécifique ou des mesures de précaution particulières pour veiller au bon déroulement de l'expérimentation. Les mesures de précaution identifiées sont à appliquer en temps utile durant le suivi des expériences. En cours des expériences, l'élément essentiel est la surveillance constante de la conduite des expériences et du comportement des participants, au fur et à mesure que la situation évolue.

En ce qui concerne le contrôle de la conduite des expériences, il s'agit entre autres de :

- s'assurer de la présence d'une connexion internet avant chaque séance. Cette mesure est indispensable au bon déroulement de l'expérimentation, puisque les scripts développés utilisent des Packages Dynamo non exécutables hors connexion,
- intervenir instantanément quand l'un des participants utilisant le prototype trouve du mal à utiliser l'une de ses fonctionnalités pour maîtriser le facteur temps et limiter la perte de temps liée à l'utilisation d'une nouvelle démarche,
- vérifier la durée de chaque séquence avant envoi pour assurer une même durée de travail pour tous les participants.

Concernant le comportement des participants durant l'expérimentation, il s'agit de :

- s'assurer du lancement du logiciel de capture vidéo d'écran au début de chaque séance,
- veiller à l'exécution des scripts Dynamo dans l'ordre indiqué pour le groupe qui travaille avec le prototype (script d'ajout des noms des pièces en premier, puis celui des noms des paramètres d'exigences, ensuite celui des valeurs des paramètres). L'exécution de ces scripts dans l'ordre est indispensable pour avoir ensuite les exigences spatiales dans l'interface de Revit,
- rappeler aux participants de la création d'un fichier de paramètres partagés, avant l'exécution du script d'ajout des noms des paramètres,
- veiller à ce que les participants prennent le temps de conception nécessaire pour produire des modèles cohérents, avant de passer au volet de vérification,
- rappeler aux étudiants qu'ils sont libres de prendre en compte ou de négliger les résultats des vérifications. Leur expliquer que la démarche proposée est conçue pour leur rappeler quelles sont les exigences non respectées, mais, qu'ils ne sont pas obligés de tout revoir à chaque vérification,
- minimiser les échanges entre participants, surtout quand il s'agit du programme architectural pour maîtriser les variables de nombre et de durée de consultation du programme. Dans ce cas, l'étudiant doit être appelé à chercher l'information tout seul dans le programme,
- noter toute observation liée au déroulement des expériences portant sur le comportement des participants dans l'utilisation du prototype développé, de sa démarche fonctionnelle, ou encore sur l'approche de conception proposée. Une fiche de suivi est préparée à cet effet (annexe 10). Cette fiche permet de noter des observations générales concernant le groupe en question ou encore des observations individuelles par étudiant (tout en indiquant la date, le numéro de la séance et le groupe expérimental en question (avec ou sans prototype).

La collecte des séquences est assurée à la fin de chaque séance. Chaque étudiant est appelé à envoyer la séquence vidéo enregistrée, à travers WeTransfer⁹², accompagnée du fichier Revit correspondant. Ce choix de la manière de collecte des données est lié principalement à la taille des séquences, très volumineuses pour être envoyées par courrier électronique. Afin de garantir des rendus valables pour le travail d'analyse, il a fallu être très méticuleux lors du contrôle de chaque rendu avant envoi. Les participants sont appelés à renommer leurs fichiers par nom et par numéro de séance. Ceux-ci sont téléchargés et classés par groupe pour être observés. Un exemple de rendu final de chaque groupe expérimental est montré dans l'annexe 11.

⁹² <https://wetransfer.com/>

8.3 Analyse des données et interprétation des résultats

8.3.1 Encodage

Après avoir clôturé les expériences et collecté l'ensemble des séquences vidéo, vient l'étape de traitement des données, au cours de laquelle les séquences de chaque participant sont encodées. Les résultats de cet encodage sont répertoriés dans une grille au fur et à mesure de la lecture de chaque séquence. La grille d'encodage obtenue contenant les données des participants des deux groupes expérimentaux est présentée dans la figure 91.

8.3.2 Analyse des données et interprétation de l'encodage

Une fois la grille d'encodage remplie, nous passons à l'étape de synthèse des données. La représentation des données de chaque variable à analyser sous forme de diagramme constitue une première vue d'ensemble des résultats. L'étude de la variance permet ensuite de confirmer ou d'infirmer l'éventuelle différence entre les variables de chaque groupe, conformément à la méthode d'analyse adoptée. Nous passons par la suite à l'interprétation des résultats obtenus.

Groupe expérimental	EXIGENCES QUANTITATIVES				EXIGENCES QUALITATIVES														CONSULTATION PROGRAMME							
	Séance N°	Nbe de pièces onques en %	Surface en %	Total surfaces respectées %	Confort							Accessibilité		Topologie				Récapitulation		Nombre de fois	Durée totale (mn)					
					Eclairage Naturel			Ensoleillement			Ventilation naturelle				Accès direct		Proximité		Contigüité			Relation	Distribution verticale	Exigences respectées par séance %	Total des exigences respectée %	
Pièces	Hall d'entrée	Cuisine	Dressing CHP	Salon	SAM	Cuisine	Séjour	CHP	Buanderie	SDE invités	SDE CHP	SDE CH enfant 1	SDE CH enfant 2	SAM/Salon	SAM/ cuisine	Séjour/ Cuisine	SDE /SAM	CH enfant1/ CH enfant 2	Cuisine / Garage	Des chambres à coucher						
AVEC PROTOTYPE	1	41	23	88																		5	80	0	0	
	2	47	12																				35	0	0	
	3	100	47																				30	0	0	
	4	100	6																				10	0	0	
	1	35	35	90																			10	100	1	1.00
	2	41	6																				45	1	0.34	
	3	100	49																				45	0	0	
	4	0	0																				0	0	0	
	1	35	23	100																			5	85	0	0
	2	88	35																				20	0	0	
	3	100	42																				55	0	0	
	4	0	0																				5	0	0	
	1	47	23	100																			25	85	0	0
	2	47	24																				25	0	0	
	3	100	53																				35	1	1.16	
	4	0	0																				0	0	0	
1	35	35	100																			10	95	1	0.41	
2	42	47																				40	0	0		
3	100	49																				45	1	0.27		
4	0	0																				0	0	0		
SANS PROTOTYPE	1	17	0	17																		30	55	4	7.18	
	2	35	11																				15	0	0	
	3	70	0																				10	0	0	
	4	88	6																				0	0	0	
	1	35	11	47																			10	70	5	8.17
	2	35	0																				10	3	1.19	
	3	76	18																				30	2	1.12	
	4	94	18																				25	1	0.40	
	1	23	0	23																			40	65	1	0.26
	2	64	11																				25	2	0.52	
	3	40	6																				0	0	0	
	4	94	6																				0	0	0	
	1	35	17	76																			45	70	1	0.10
	2	41	18																				10	2	1.15	
	3	82	29																				5	1	0.24	
	4	100	12																				10	0	0	
1	17	0	30																			15	45	2	3	
2	41	6																				20	3	4.16		
3	70	18																				10	0	0		
4	88	6																				0	0	0		

Figure 91 Grille d'encodage des données des expériences

Les variables issues de la synthèse concernent :

- la moyenne des exigences respectées par groupe,
- la moyenne des exigences respectées par groupe par séance,
- la moyenne des consultations du programme par groupe,
- la moyenne des durées des consultations par groupe par séance.

a- Moyenne des ESQ_L respectées par groupe

Analyse :

Le premier diagramme concerne la moyenne des ESQ_L respectées (figure 92). Ce diagramme montre que le groupe des étudiants qui ont travaillé avec le prototype a respecté 89% des exigences qualitatives demandées, alors que celui qui a travaillé avec la démarche classique de conception en a respecté 61%. L'utilisation de la démarche de conception proposée a permis ainsi au premier groupe (avec prototype) de répondre à 28% en plus des ESQ_L. Pour vérifier la signification des résultats, l'emploi du test T a permis d'admettre qu'il existe une différence significative entre les moyennes des ESQ_L respectées par les deux groupes, avec une valeur de signification de 0,02.

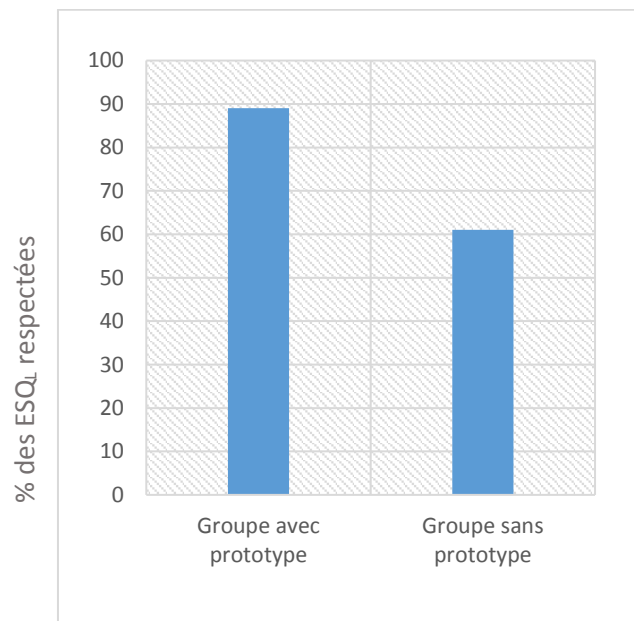


Figure 92 Diagramme de la moyenne des ESQ_L respectées par groupe expérimental.

Interprétation :

L'utilisation de l'approche de conception proposée a permis au groupe des étudiants qui ont travaillé avec le prototype de respecter significativement plus d'ESQ_L et de produire ainsi des modèles de conception plus conformes aux exigences demandées. La présence des ESQ_L sur la plateforme Revit a facilité leur consultation et a favorisé par conséquent leur respect. Il est à noter qu'au cours de l'expérience, le changement de comportement des participants n'était pas immédiat. Ils ont acquis l'usage de la consultation des exigences du programme sur l'interface de Revit progressivement, vu qu'il s'agit d'une nouvelle démarche de conception.

Il a été observé aux cours des expériences que la démarche de vérification de la conformité des pièces a constitué un facteur considérable permettant de rappeler aux concepteurs les exigences non respectées, et ce, par la mise en évidence graphique des pièces concernées. Elle a assuré une sensibilisation continue des concepteurs au respect des ESQ_L tout au long du processus de conception. Ce qui explique la différence entre les rendus des deux groupes. Avec des rendus plus complets en matière d'éléments (vues 3D intérieures, élévations, aménagement), mais aussi en matière de réponse architecturale pour les participants qui ont travaillé avec le prototype. L'annexe 11 montre un exemple de rendu de chacun des groupes.

b- Moyenne des exigences qualitatives respectées par groupe par séance

Analyse :

Pour le groupe des étudiants qui ont travaillé avec le prototype, le diagramme (figure 93) montre une progression croissante sur les trois premières séances, allant de 11% d'ESQ_L respectées au niveau de la première séance, passant par 33% durant la deuxième séance pour atteindre 42% au cours de la troisième séance. Néanmoins, à la quatrième séance ce pourcentage a marqué une chute brutale et est réduit à 3%. Tandis que, pour le groupe des étudiants qui ont travaillé avec la démarche classique de conception, ce diagramme montre une progression décroissante, allant de 28% d'ESQ_L respectées durant la première séance, pour arriver jusqu'à 7% durant la dernière séance en passant par 16%, puis par 11% durant la deuxième et la troisième séance.

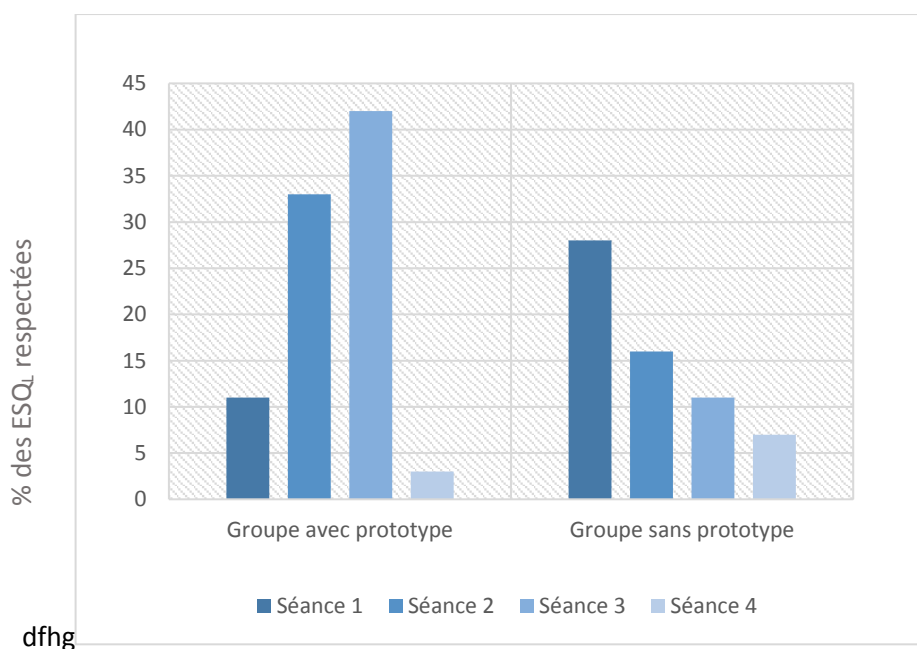


Figure 93 Diagramme des ESQ_L respectées par groupe expérimental et par séance

Interprétation :

Le diagramme des ESQ_L respectées par groupe par séance montre une **progression croissante** pour le groupe des étudiants qui ont travaillé avec prototype durant les trois premières séances, ce qui indique qu'ils se sont attachés peu à peu au respect des ESQ_L. Quant à la chute illustrée au cours de la quatrième séance, elle est expliquée par la diminution du temps de conception, puisque 60% de ces participants ont terminé leurs modèles à la fin de la troisième séance et se sont occupés au cours de la quatrième séance à la mise en page de leurs rendus. Tandis que le diagramme du groupe des étudiants qui ont travaillé avec la démarche classique de conception montre une **progression décroissante**, ce qui démontre que les participants de ce groupe se sont détachés peu à peu du respect des ESQ_L au fur et à mesure de l'avancement de la conception. **La comparaison des deux diagrammes permet de constater que l'utilisation de l'approche de conception proposée a permis d'orienter l'intérêt des concepteurs vers le respect des ESQ_L.**

Il a été observé au cours des expériences que la plupart des participants qui ont utilisé le prototype se sont focalisés durant la première séance sur le respect des exigences d'ordre quantitatif (les surfaces des pièces), en exécutant les scripts de vérification des surfaces au fur et à mesure de l'ajout des pièces (figure 94). Ce comportement explique le faible pourcentage mesurant le respect des exigences d'ordre qualitatif durant cette séance (11%). Ensuite, les participants se sont concentrés au cours de la deuxième et la troisième séance sur le respect

des ESQ_L grâce à l'exécution des scripts de vérification fournis. C'est pour cette raison que le pourcentage mesurant le respect des ESQ_L est remarquablement élevé durant ces deux séances (33% et 42%).

Nous avons remarqué lors du déroulement de l'expérience que les participants ont mis du temps pour s'habituer à la nouvelle approche de conception, surtout durant la première séance. Il aurait été intéressant d'encoder le temps d'apprentissage laissé par chaque étudiant pour pouvoir mesurer ensuite son impact sur la durée totale de conception, chose que nous n'avons pas pris en compte durant la détermination des variables à analyser.

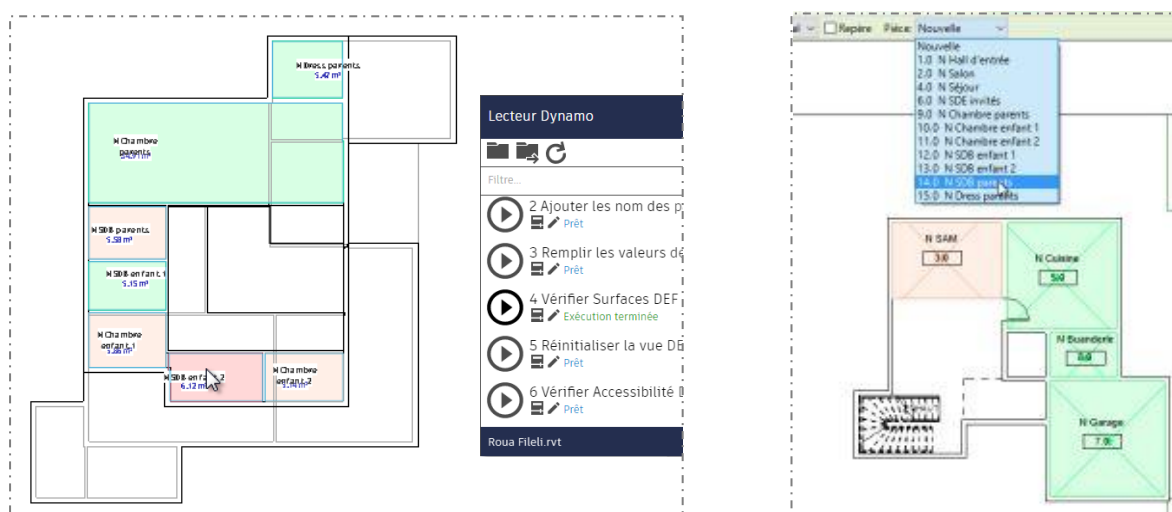


Figure 94 Exemples de l'avancement d'un étudiant qui a travaillé avec le prototype durant la première séance (concentration sur le respect des exigences de surface)

c- Moyenne des consultations du programme par groupe par séance

Analyse :

L'observation du diagramme des moyennes des consultations du programme par groupe et par séance (figure 95) montre une disparité des résultats des deux groupes expérimentaux. Même si les moyennes des consultations illustrées sont assez faibles en majorité, n'atteignant pas quatre consultations par séance (programme architectural assez simple), l'écart entre les deux groupes reste remarquable. En effet, la moyenne des consultations la plus élevée est celle des participants du groupe qui a travaillé avec la démarche classique de conception avec 3,74 consultations, devant 0,28 consultation pour le groupe des étudiants qui ont utilisé le prototype. L'application du test T à l'ensemble de ces données a permis de conclure qu'il existe

une différence significative entre les moyennes des consultations du programme par les deux groupes, avec une valeur de signification de 0,03.

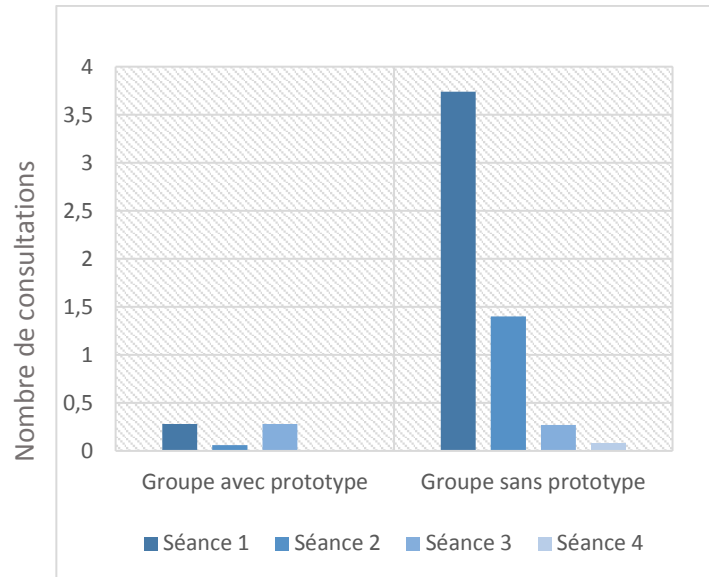


Figure 95 Diagramme des moyennes du nombre de consultations du programme par groupe expérimental et par séance

Interprétation :

Pour le groupe des étudiants qui ont travaillé sans prototype, le diagramme montre un profil décroissant. Partant de 3,74 pour arriver jusqu'à 0,08, où la plus forte concentration en nombre de consultations est illustrée au niveau des deux premières séances. Ces deux séances correspondent en effet aux séances durant lesquelles les participants de ce groupe ont respecté le nombre le plus élevé d'ESQ_L respectées (figure 93). Au-delà de ces deux premières séances, ces participants ont commencé à se détacher du programme architectural. **L'utilisation du prototype a permis ainsi aux participants de consulter le programme architectural nettement moins.** Les participants qui ont travaillé avec le prototype se sont trouvés ainsi détachés du programme architectural tout en restant informés des exigences du projet (présentes dans l'outil de conception).

d- Moyenne des durées de consultation par groupe par séance

Analyse :

Le diagramme des moyennes des durées de consultation du programme par groupe et par séance (figure 96) montre également une disparité des résultats des deux groupes : les durées de consultation sont beaucoup plus faibles pour les participants qui ont travaillé avec le prototype, comparées aux durées de ceux qui ont travaillé sans. Conformément au diagramme des moyennes du nombre des consultations, le diagramme des durées des consultations montre également un profil décroissant pour le groupe des étudiants qui ont travaillé sans prototype, avec une forte concentration durant les deux premières séances. Tandis que les durées de consultations du groupe qui a utilisé le prototype restent assez faibles en majorité, ne dépassant pas 0,4 minute par séance. Pour vérifier la signification de ces résultats, l'emploi du test T a permis de confirmer la différence significative entre les moyennes des deux groupes, avec une valeur de signification de 0,03.

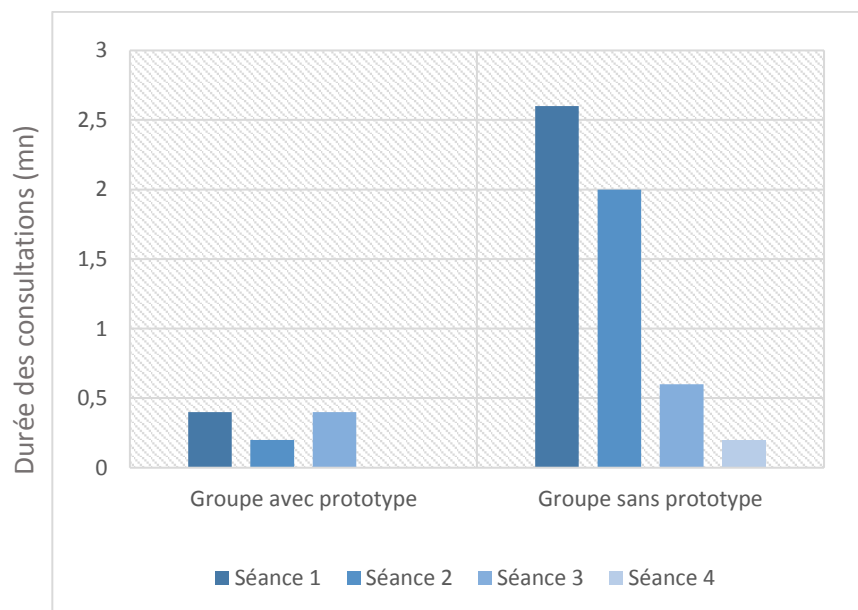


Figure 96 Diagramme des moyennes des durées de consultation du programme par groupe expérimental et par séance

Interprétation :

Le groupe des étudiants qui ont travaillé avec le prototype a gagné non seulement en nombre de consultations, mais aussi en temps dépensé à la lecture du programme à chaque consultation. Quant au groupe qui a travaillé avec la démarche classique de conception, il a

perdu considérablement plus de temps à la consultation du programme. Nous pouvons en conclure ainsi, que **l'approche de conception proposée permet de réduire le temps consacré à la consultation du programme et d'optimiser ainsi le temps de conception.**

Bien que les moyennes des durées de consultation du programme restent minimales par rapport à la durée d'une séance (1h :50), leur impact sur l'avancement de la conception est considérable. Ceci peut être expliqué par la déconcentration engendrée après chaque consultation. En effet, nous avons remarqué lors de l'observation des séquences vidéo, qu'en retournant sur Revit après avoir consulté le programme, certains participants mettent du temps à reprendre la conception là où ils l'avaient laissée. Cet effet de déconcentration a été relié à la durée des consultations : plus la durée de la consultation est importante, plus elle cause de la déconcentration au concepteur. Cette gêne s'est manifestée par des changements de vue (en plan, en élévation ou en 3D) ou par des actions répétitives de zoom arrière / zoom avant pour avoir une vue d'ensemble. D'autres participants ont complètement changé de point d'intérêt après la consultation du programme, en laissant la partie sur laquelle ils travaillaient inachevée (ex. passer de la résolution des ESQ_L à celles de surface, passer à d'autres parties de la conception en affichant la vue d'ensemble, etc.).

Pour démontrer ce constat, il aurait fallu encoder la variable de temps de déconcentration pour la comparer d'une part à la durée totale de conception et d'autre part à la durée des consultations. Cette variable n'a pas été prise en compte dans notre travail d'analyse, mais se montre très utile dans de futurs travaux pour mesurer l'impact de déconcentration causé par la consultation du programme.

8.4 Bilan

Dans ce chapitre, l'approche de conception proposée a été expérimentée dans des situations de conception réelles, où elle a été confrontée à l'approche classique de conception. Deux groupes de concepteurs sont suivis et observés à cet effet, travaillant sur un même programme architectural, chacun suivant une approche de conception.

Le travail d'expérimentation s'est déroulé sur trois étapes. La première étape a porté d'abord sur la définition du protocole expérimental. Ensuite, la deuxième étape a consisté à la mise en route et au suivi du déroulement des expériences pour arriver enfin au travail d'analyse des données et d'interprétation de l'encodage. L'interprétation des résultats des deux expériences a permis de constater que l'approche de conception proposée, reposant sur l'usage de prototype intégré à l'outil BIM, a permis d'orienter l'intérêt des concepteurs vers les ESQ_L demandées par le programme. Elle a assuré une sensibilisation continue au respect de ces exigences tout au long du processus de conception et a permis, par conséquent, de produire des modèles plus conformes aux exigences spatiales qualitatives. Il a également été constaté que cette approche a permis de réduire le temps consacré à la consultation du programme et d'optimiser ainsi le temps de conception. Le concepteur n'a presque plus besoin de consulter le programme architectural, ayant les exigences et les contraintes intégrées dans l'outil de conception.

À travers ce travail d'expérimentation, nous avons pu identifier l'impact de l'utilisation de la démarche développée sur un processus de conception. Des résultats significatifs ont été obtenus pour l'ensemble des variables définies, affirmant que l'approche développée permet de produire des modèles plus conformes aux ESQ_L et d'optimiser le temps de conception. Il est toutefois à noter que ces résultats sont obtenus à travers un protocole expérimental appliqué sur un projet restreint dans un milieu pédagogique. Ils permettent de valider les hypothèses de ce travail de recherche, mais ne suffisent pas à la validation de l'approche de conception développée et du modèle d'espace sous-jacent. Ces résultats constituent néanmoins une première étape de validation qui encourage à s'engager dans un processus de validation plus large, en expérimentant cette approche dans un milieu professionnel réel avec différents types d'agences et sur différents types de grands projets (ex. un hôpital, une école, un centre commercial).

Pour valider nos hypothèses, un travail d'inspection et d'évaluation doit être d'abord effectué en retour d'expérience, pour s'interroger sur l'efficacité de la mise en œuvre de l'expérimentation dans le respect du protocole expérimental défini et suivant la démarche fonctionnelle spécifiée. Le chapitre suivant porte ainsi un regard plus critique sur le travail d'expérimentation et sur l'approche de conception développée.

CHAPITRE 9 :

RETOURS SUR EXPERIMENTATION ET VALIDATION DES HYPOTHESES

Ce dernier chapitre représente une deuxième étape d'évaluation de l'approche de conception développée. Elle consiste en un retour sur l'expérimentation reposant sur les observations notées au cours du déroulement des expériences et lors de l'examen des séquences vidéo collectées. Cette deuxième étape d'évaluation propose une analyse critique des expériences dont l'objectif est de questionner l'aboutissement de chacune des étapes du protocole expérimental dans le respect de la démarche fonctionnelle prévue. Elle propose également des pistes d'amélioration du protocole qui permettrait d'obtenir des résultats encore plus précis et valides.

9.1 Analyse critique du type d'expérimentation

Le travail d'encodage a constitué un ultime contrôle, non seulement de la procédure envisagée en ce qui concerne l'analyse des résultats, mais aussi de l'adéquation de l'ensemble du protocole quant aux objectifs du travail d'expérimentation.

9.1.1 Concernant le type de projet

Le type de projet choisi a joué un rôle prépondérant pour mener à bien les expériences dans la durée envisagée. Le programme de villa de maître nous a permis d'associer un grand nombre d'exigences qualitatives aux espaces demandées, sans pour autant constituer un programme compliqué nécessitant un temps de conception plus considérable. Étant basée sur les observations du test de niveau effectué à l'avance, la durée envisagée des expériences a été tout à fait suffisante pour l'obtention de modèles de conception cohérents (annexe 11). La différence entre les résultats des deux groupes expérimentant chacun une approche de conception a été significative, aussi bien en matière de respect des ESQ_L qu'en matière de gain de temps de conception (chapitre 8).

Limites :

Nous avons expliqué dans le chapitre précédent que l'expérimentation de notre approche sur un grand projet et dans un milieu professionnel réel n'est pas envisageable dans le cadre de ce travail de recherche en thèse. En effet, le temps de déroulement des expériences et la durée nécessaire au travail d'encodage et d'analyse dépasseraient largement la durée envisagée pour l'expérimentation.

Cependant on peut supposer que l'écart illustré entre les deux approches de conception expérimentées aurait pu être beaucoup plus significatif, notamment dans le cadre de la conception de plus grands projets, comme les hôpitaux, les universités, ou autres types d'ouvrages publics basés sur des études de programmation beaucoup plus complexes. Quand les ESQ_L sont décrites sous forme textuelle sur des centaines de pages. Le concepteur se trouve plus que jamais obligé de consulter le programme architectural autant de fois que d'exigences demandées pour chercher l'information dont il a besoin et pour vérifier encore et encore la correspondance de son modèle de conception aux exigences décrites. La situation devient encore plus contraignante quand le projet se déroule dans le cadre d'un concours de conception architecturale. La contrainte de temps devient ainsi capitale et le respect des exigences demandées devient un ultime avantage de

sélection des projets soumis. C'est dans ce cadre où devrait se manifester un plus grand intérêt de notre approche et où l'expérimentation devrait mener à des résultats beaucoup plus intéressants en ce qui concerne le respect des ESQ_L et l'optimisation du temps de conception.

9.1.2 Concernant les groupes expérimentaux

Critiques :

L'approche a bien évidemment été développée dans le but d'être appliquée dans le cadre de grands projets, dans un milieu professionnel réel qui suit une démarche BIM. Elle a cependant été expérimentée au niveau de cette étude dans un milieu pédagogique, avec des participants qui sont encore en apprentissage des logiciels utilisés (Revit et Dynamo), mais aussi en apprentissage par rapport à la conception architecturale dans sa globalité (étudiants en troisième année architecture).

Pistes d'amélioration :

L'expérimentation de cette approche de conception dans un milieu professionnel réel avec des participants qui ont de l'expérience en conception architecturale et qui maîtrisent les logiciels utilisés (ex. un concours restreint de conception, deux groupes d'architectes ou d'agences d'architecture) pouvait mener vers des résultats plus précis et valides et pouvait notamment mettre en évidence la différence entre l'approche classique de conception et celle proposée, en matière de respect.

9.2 Analyse critique de l'approche de conception proposée

L'expérimentation a été la première occasion d'observer une utilisation réelle de l'approche de conception développée. Nous nous sommes ainsi plus particulièrement intéressés au cours des expériences à l'observation des modalités d'utilisation du prototype, de sa cohérence fonctionnelle et des retours par rapport à l'utilisation de l'approche.

9.2.1 Concernant le prototype développé

Durant le déroulement des expériences et lors de l'observation des séquences vidéo, nous nous sommes intéressés à l'étude des expériences du groupe qui a utilisé le prototype pour vérifier que chaque étape de la démarche de mise en œuvre du prototype a abouti dans la durée prévue.

Concernant les temps d'exécution et conformément à ce qui a été prévu, les scripts de vérification des exigences ont affiché instantanément les résultats graphiques, ce qui les a rendus adaptés à une démarche de vérification continue, impliquant des exécutions successives (vérifier, revoir le modèle et revérifier). Quant aux scripts d'ajout des exigences à Revit (trois scripts), leur complexité ne permet pas d'obtenir des temps d'exécution de l'ordre de l'instantané. Les temps d'exécutions correspondants sont restés toutefois raisonnables au cours de l'expérience (entre 3 et 10 secondes). Nous considérons ces durées comme négligeables, car elles n'influencent pas l'évolution de la conception, surtout que chacun de ces trois scripts est à exécuter une seule fois au cours du processus de conception (au début du projet).

Les noms des paramètres d'ESQ_L ajoutés à Revit sont bien structurés par catégorie et par type d'exigence, ce qui a permis une lecture simple suivant la logique de raisonnement du concepteur de la manière suivante : les exigences de topologie, suivies de celles d'accessibilité, puis celles de confort à l'intérieur des pièces conçues.

Critiques :

Durant l'expérience, le contrôle de la perte de temps liée à l'utilisation d'une nouvelle démarche n'a pas été évident. Malgré les efforts fournis durant la séance préliminaire pour l'explication et la démonstration des étapes de la démarche fonctionnelle du prototype, les participants ont perdu du temps à découvrir l'approche proposée au début de la conception. La différence entre la moyenne des ESQ_L respectées par les deux groupes expérimentaux durant la première séance de l'expérimentation en témoigne (figure 93). En effet, durant cette séance les étudiants qui ont travaillé avec le prototype ont respecté considérablement moins d'exigences (11%) que ceux qui ont travaillé avec l'approche classique de conception (27%). Le diagramme croissant des moyennes des ESQ_L respectées par les étudiants qui ont travaillé avec le prototype de la première à la troisième séance de l'expérimentation démontre que plus les participants s'habituent à l'utilisation de l'approche proposée, plus ils respectent d'exigences.

Concernant les scripts Dynamo, ceux vérifiant la proximité et les surfaces des pièces comportent des contraintes quantitatives (la distance maximale pour la vérification de la proximité des pièces et la marge de d'acceptabilité du respect des surfaces). Ayant un caractère plus ou moins invariable d'un projet à un autre, ces contraintes ont été prédéfinies à l'intérieur des scripts de vérification correspondants. La figure 97 montre le curseur utilisé dans le script pour paramétrer la distance maximale de proximité entre les portes des pièces.

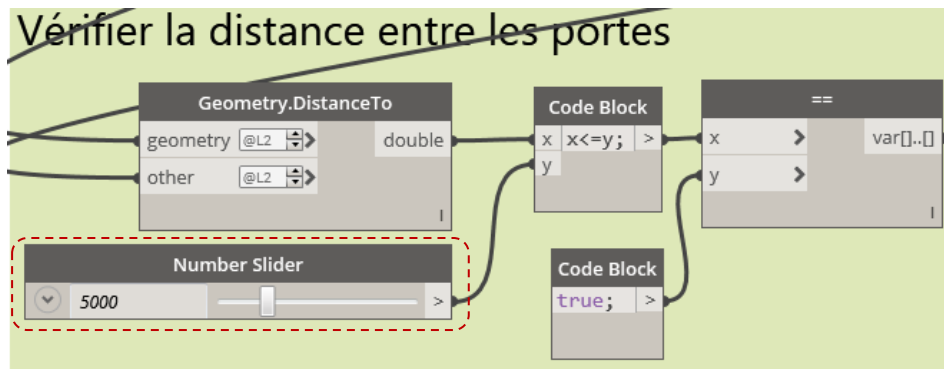


Figure 97 Capture d'écran Dynamo, extrait du script de vérification de la proximité des pièces

Pistes d'amélioration :

La détermination des contraintes quantitatives ci-dessus mentionnées dans les scripts Dynamo les rend inchangeables, car dans notre démarche fonctionnelle ni le programmeur ni le concepteur ne sont habilités à ouvrir ou modifier les scripts fournis. Il serait ainsi envisageable dans une prochaine version du prototype d'ajouter ces contraintes au tableau des exigences (Excel) pour permettre au programmeur d'y avoir accès et de pouvoir les modifier selon le besoin.

Pour limiter la perte de temps liée à l'apprentissage de l'approche proposée, il serait d'intérêt de fournir aux concepteurs un tutoriel, sous forme de vidéo YouTube par exemple, qui explique en détail la démarche fonctionnelle du prototype et qui mentionne les mesures de précaution à prendre à chacune de ses étapes. Ceci permet aux utilisateurs de l'approche d'avoir une référence à suivre tout au long du processus de conception et de retrouver des réponses à leurs questions en temps utile.

9.2.2 Concernant la démarche fonctionnelle du prototype

À travers le suivi du déroulement des expériences, nous avons pu nous constituer une idée sur les retours de la part des participants, mais aussi prendre du recul par rapport à la démarche fonctionnelle du prototype développé et constituer un regard critique portant sur certains aspects du scénario prévu.

Les participants ont montré beaucoup d'intérêt quant à l'utilisation du prototype. Ils ont bien apprécié la conception en ayant les ESQ_L dans Revit et ont commencé, peu à peu, à s'approprier la pratique de visualiser les exigences dans la liste des contraintes des pièces. Certains participants se sont précipités sur le volet de la vérification automatique de leurs modèles de conception. Il a fallu donc intervenir pour contrôler la situation et les appeler à se concentrer sur la conception, jusqu'à aboutir à des modèles cohérents avant de pouvoir passer au volet de la vérification. D'autres participants ont témoigné même de la facilité et du gain de temps que peut apporter une telle approche de conception. Ils se sont montrés intéressés pour comprendre les scripts développés et pour avoir la possibilité d'utiliser le prototype dans leurs projets en atelier d'architecture.

Critiques :

Concernant l'utilisation du prototype, malgré les tests d'utilisation effectués et les mesures de précautions utilisées tout au long des expériences, les participants n'ont pas utilisé le prototype dans le respect exact de la démarche fonctionnelle prévue.

Certaines différences d'usage détectées dans l'utilisation du prototype sont dues à des problèmes de changement de démarche. L'utilisation effective ne correspond pas toujours à l'utilisation désirée, car le changement n'est pas toujours perçu comme prioritaire et certains préfèrent préserver les acquis de la démarche de conception habituelle. Il a été constaté au cours de l'expérience que :

- les participants tendent à adapter le prototype à leurs démarches de conception habituelles et à investir dans son utilisation d'anciennes pratiques qui leur sont familières (ex. oublier des pièces du programme et en rajouter de nouvelles pièces à la place, mais des pièces qui ne portent pas les paramètres d'exigences du programme),

- ils ne réussissent pas toujours à employer les scripts de vérification dans une logique qui favorise l'avancement de la conception. Ces scripts sont développés pour être exécutés dans une logique de groupement par type d'exigence. Les exigences de topologie et d'accessibilité représentent des contraintes déterminantes dans la mise en forme du projet. Les scripts de vérification correspondants doivent être utilisés jusqu'à l'obtention d'une proposition de conception cohérente, avant de passer à l'utilisation des scripts de vérification des exigences de confort. Les concepteurs qui n'ont pas suivi cette logique ont été déconcentrés par moments, dans l'aboutissement de leurs réponses architecturales.

D'autres différences d'usage détectées sont liées au mode de fonctionnement actuel de l'outil Revit orienté vers les ouvrages du bâtiment. Durant les premières ébauches de la conception, notre démarche prévoit une composition par pièces pour former un organigramme fonctionnel. Sur la base de cet organigramme, les concepteurs doivent ajouter ensuite les éléments délimitant (murs, séparateurs de pièces, murs rideaux, etc.) pour constituer une première proposition de leurs modèles de conception. Toutefois, il a été constaté durant l'expérience que les participants ne sont pas arrivés à appliquer cette démarche à l'identique (figure 98). **En effet, un problème s'est manifesté dans l'ajout des éléments délimitant les pièces qui est lié au fonctionnement de Revit** qui réalise l'extension automatique de l'emprise d'une pièce lors de l'ajout d'une délimitation fermée tout autour (figure 98-a). Nous avons remarqué durant l'observation des séquences collectées que les participants ont respecté la première partie du scénario prévu en définissant un organigramme fonctionnel selon la démarche proposée. Puis, ils ont mis cet organigramme de côté sur l'interface graphique de Revit (en dehors du terrain) et ils ont commencé à concevoir sur le terrain en utilisant une démarche habituelle de conception. Ainsi, ils ont ajouté des murs extérieurs selon les limites du retrait réglementaire et selon la forme de l'organigramme, formant ainsi un volume constructible fermé (figure 98-b). Puis ils sont passés à la décomposition de ce volume par des murs intérieurs en créant des vides pour y placer les pièces de l'organigramme constitué. Les participants ont ainsi adapté la démarche proposée au mode de fonctionnement de l'outil Revit et à des pratiques de conception qui leur sont propres.

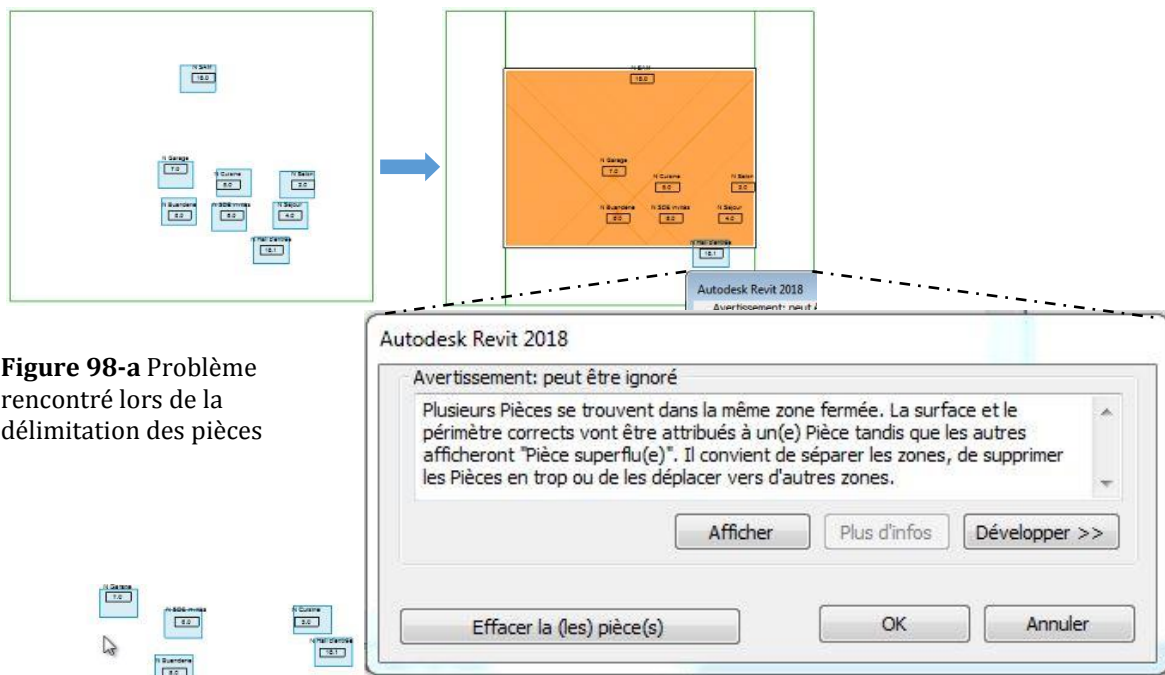


Figure 98-a Problème rencontré lors de la délimitation des pièces

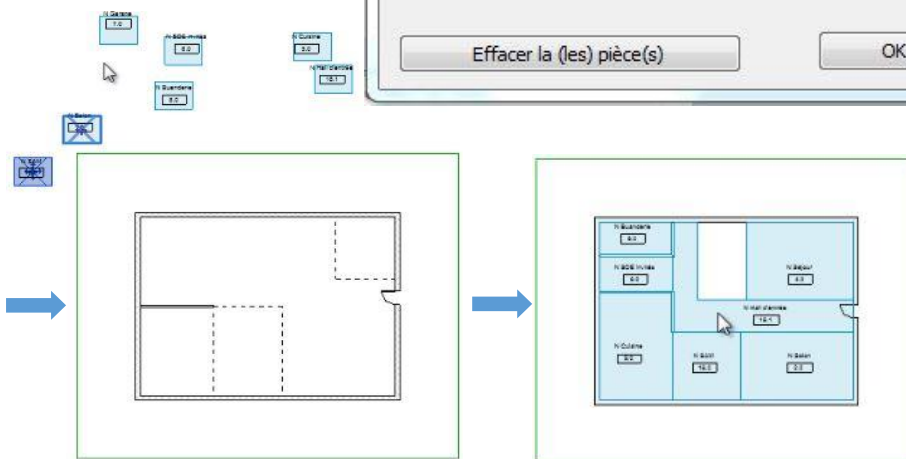


Figure 98-b la façon dont les participants ont réagi face au problème rencontré.

Figure 98 Captures d'écran Revit, étapes de la démarche de conception suivie par un participant qui a travaillé avec le prototype

Pistes d'amélioration :

Cette démarche peut être appliquée précisément comme elle est prévue en ajoutant les limites des pièces, les unes après les autres. Mais, elle pourrait être beaucoup plus simple à appliquer quand les outils BIM adopteraient un mode de fonctionnement orienté « espace ». L'outil Revit a commencé à développer des fonctions dans ce sens. Sa version 2018 permet de créer des volumes in situ et de concevoir avec, pour ajouter ensuite l'enveloppe extérieure (figure 99). L'utilisation de cette fonction avec notre démarche permettrait de faciliter la conception à partir d'un organigramme fonctionnel en volume.

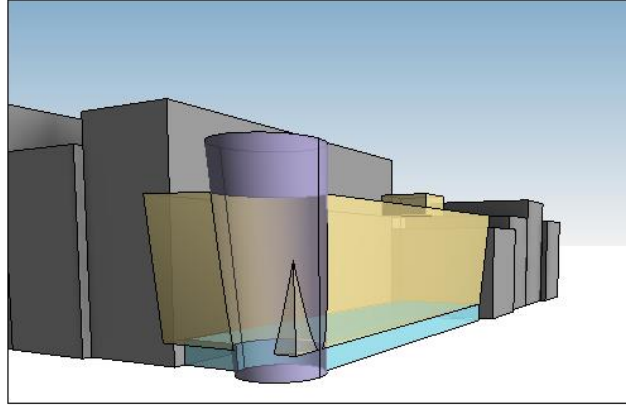


Figure 99 Conception avec des volumes in situ, Revit 2018 (knowledge.autodesk.com)

La démarche de conception proposée peut être adoptée par le biais de la pratique. Les concepteurs devraient se l'approprier après avoir pris conscience de son intérêt. Prévoir un tutoriel à suivre expliquant en détail les différentes étapes de la démarche fonctionnelle de l'approche de conception proposée pourrait en assurer une meilleure application.

9.2.3 Concernant le modèle d'espace spécifié

Nous n'avons pas identifié de limites ou de critiques du modèle d'espace spécifié durant les deux étapes d'évaluation, ceci est dû à la manière dont l'expérimentation a été définie. En effet, dans la définition du programme architectural de l'exercice nous avons essayé de prendre en compte le maximum possible des valeurs d'exigences énumérées par notre modèle d'espace, en particulier les énumérations auxquelles nous avons pu développer des scripts de vérification. De ce fait, l'expérimentation a été inconsciemment limitée aux exigences spécifiées par notre modèle.

L'expérimentation de cette approche de conception sur un projet plus réel dont le programme architectural est défini par une agence spécialisée en programmation pouvait révéler d'autres énumérations d'exigences qui ne sont pas prises en compte par notre modèle d'espace. Ces éventuelles énumérations représentent des pistes d'alimentation et d'enrichissement possibles qui pouvaient alimenter les énumérations des ESQ_L de notre modèle.

9.3 Validation des hypothèses

Notre approche a été évaluée à travers un protocole expérimental de validation par rapport aux critères de nombre d'ESQ_L respectées et d'optimisation de temps de conception. Les gains en matière d'exigences respectées et en matière de temps de conception ont été satisfaisants et permettant d'envisager un protocole expérimental plus large dans le but d'obtenir un niveau de validation plus élevé de l'approche et ainsi favoriser sa généralisation.

L'analyse critique des expériences a montré que le travail d'expérimentation s'est bien déroulé dans le respect du protocole expérimental défini et que l'approche proposée ne présente pas de failles empêchant son utilisation et que son application est plus adaptée aux nouvelles fonctionnalités de conception de volumes In-Situ des outils BIM actuels. Le travail d'analyse critique a également démontré que l'approche proposée a été expérimentée dans le respect de la démarche fonctionnelle prévue moyennant quelques différences. Ces différences ont été liées aux difficultés de changement de démarche, ou au mode de fonctionnement de l'outil Revit. Les retours sur l'expérimentation ont plutôt permis de déterminer les avantages et les limites de notre approche et d'en envisager certaines pistes d'amélioration qui pourraient conduire vers des résultats encore plus précis et valides.

L'inspection du travail d'expérimentation a démontré la validité des résultats obtenus. Nous pouvons ainsi répondre au questionnement principal soulevé par notre problématique (quel serait l'impact d'une approche de conception qui prend en compte les ESQ_L sur les pratiques BIM actuelles ?) et valider, par conséquent, les hypothèses formulées en affirmant que :

- **La prise en compte des ESQ_L dans l'outil BIM et la vérification de la conformité de la conception à ces exigences peuvent assister les concepteurs à produire des modèles BIM plus conformes aux exigences du programme,**
- **Cette nouvelle approche peut assister les concepteurs à optimiser le temps de conception.**

Outre le gain en termes de temps et de nombre d'ESQ_L respectées, nous avons identifié durant le déroulement des expériences un autre critère pouvant encourager l'utilisation de l'approche. Il s'agit de l'orientation de l'intérêt des concepteurs vers la prise en compte de toutes les pièces demandées par le programme dès les premières ébauches de la conception. En effet, les participants utilisant l'approche proposée ont pris en compte dans leurs modèles de conception toutes les pièces demandées, alors que certaines pièces ont été omises par les participants qui ont travaillé avec la démarche classique de conception. Pour évaluer ce constat, nous avons considéré

la variable de la moyenne des pièces conçues par séance et par groupe expérimental (figure 91), les données sont ensuite représentées sous forme de courbes. Le diagramme obtenu (figure 100) montre une différence dans l'évolution de la prise en compte des pièces par les deux groupes expérimentaux. La courbe du groupe qui a utilisé l'approche de conception proposée est clairement plus élevée que celle du groupe qui a travaillé avec l'approche classique de conception. Le plus grand écart est illustré durant la troisième séance, dépassant les 50% des pièces qui sont déjà conçues. Cette séance correspond à celle durant laquelle le groupe qui a travaillé avec le prototype s'est focalisé sur la vérification des ESQ_L (figure 93).

La démarche fonctionnelle du prototype implique la prise en compte de toutes les pièces demandées par le programme pour pouvoir avancer dans la conception. **Elle permet ainsi d'orienter la vision du concepteur vers les pièces demandées par le programme et vers le respect de leurs exigences, désormais disponibles dans l'outil de conception.**

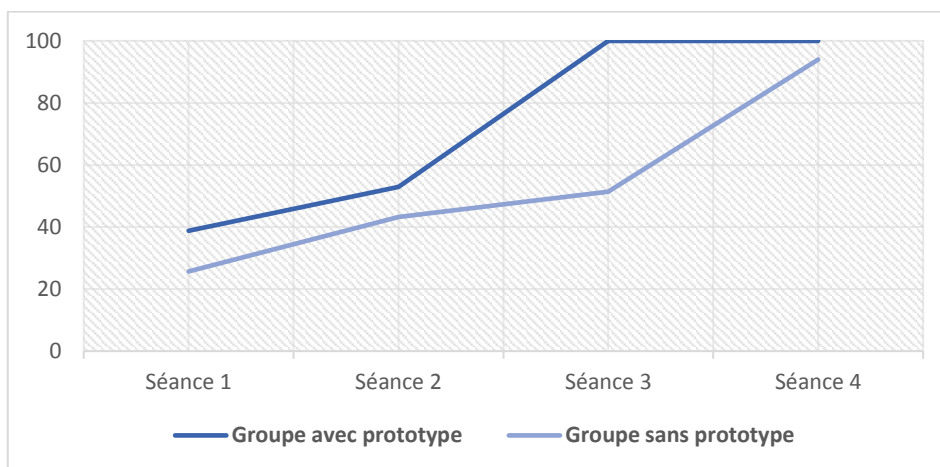


Figure 100 Courbes des pourcentages mesurant les pièces ajoutées par groupe et par séance.

9.4 Bilan

Après avoir expérimenté l'approche de conception développée, ce dernier chapitre a porté un œil critique sur le déroulement de l'expérimentation afin de questionner l'aboutissement de chacune des étapes du protocole expérimental dans le respect de la démarche fonctionnelle prévue. Cette analyse critique est basée sur les observations qui ont été notées au cours du déroulement des expériences et au fur et à mesure du travail d'encodage.

Cette deuxième étape d'évaluation a permis de constater que les deux expériences se sont bien déroulées dans le respect du protocole expérimental défini. Elle a toutefois révélé que l'approche de conception développée n'a pas été utilisée à l'identique conformément à la démarche fonctionnelle prévue. Certaines différences d'usage ont été détectées. Ces différences sont liées soit à des difficultés de changement de démarche, soit au mode de fonctionnement actuel de l'outil Revit. Nous avons également constaté que l'approche proposée ne présente pas de failles empêchant son utilisation et que certaines nouvelles fonctionnalités des outils BIM actuels se trouvent plus adaptées à son application.

Nous rappelons que, dans son état actuel, notre approche de conception ne peut être utilisée qu'avec l'outil Revit qui est compatible avec les scripts Dynamo développés. Son utilisation avec d'autres outils BIM nécessite la traduction de ces scripts dans les langages de programmation visuelle compatibles (ex. traduction des scripts en Grasshopper pour ArchiCAD).

Le travail d'évaluation a permis de valider les hypothèses de ce travail de recherche. Il a également constitué une première étape de validation de l'approche de conception développée qui encourage à la réalisation d'une validation à une plus large échelle.

CONCLUSION GENERALE

Bien que la couverture de la technologie BIM de toute l'information sur le bâtiment constitue depuis quelques années un sujet de multiples travaux de recherche, celle-ci reste encore incapable de couvrir un large éventail d'informations qui concernent la programmation architecturale, plus particulièrement les ESQ_L. Ceci est dû principalement à la structure actuelle des formats BIM, et plus particulièrement le format IFC, quoique fournissant une représentation plus ou moins complète des informations sur le bâtiment durant les phases de conception et de construction, ils montrent encore certaines limites quant à la prise en compte des ESQ_L de la phase de programmation. Le lien entre les pratiques BIM actuelles et celles préconisées dans le monde de la recherche dans ce contexte reste extrêmement faible. Même si, notre étude a modestement contribué à l'enrichir, il n'en demeure pas moins qu'il reste encore à faire.

Les ESQ_L jouent un rôle important dans la mise en forme et dans l'évaluation de la conception. Leur présence dans l'outil BIM est essentielle et doit faire l'objet d'une réflexion approfondie. Ces exigences permettent d'assister la co-production architecturale en orientant la vision des concepteurs vers le respect du programme tout au long du processus de conception. De plus, disposer des ESQ_L dans l'outil BIM permet d'instaurer une démarche d'évaluation automatique de la conformité de la conception qui vise à assister les concepteurs à produire des modèles BIM plus conformes aux exigences du programme, mais également à optimiser le temps de conception.

Apport

Appréhender les ESQ_L les plus fréquemment utilisées dans la description des contraintes sur les espaces en phase de programmation architecturale a été l'un des objectifs premiers de notre étude. Grâce à une analyse qualitative auprès d'une sélection de documents de programmation architecturale, nous avons pu identifier, catégoriser et répartir par ordre d'importance les qualificatifs utilisés pour décrire ces exigences. Trois types d'ESQ_L ont été identifiés, à savoir les exigences d'accessibilité, les exigences de topologie (disposition, relation et distribution) et celles de confort (confort lumineux, hygrométrique, acoustique, thermique et de sécurité). Cette étape nous a sensibilisé davantage à l'importance des ESQ_L en phase de programmation architecturale et à la nécessité de leur prise en compte dans les pratiques BIM actuelles. Il est toutefois à noter que ce travail d'identification est loin d'être suffisant pour couvrir tous les qualificatifs possibles et imaginables. La sélection d'un corpus de documents encore plus large permettrait de détecter d'autres qualificatifs qui pourraient alimenter nos grilles de catégorisation et enrichir les diagrammes de répartition des ESQ_L résultants de cette étude.

L'état de l'art a ensuite confirmé que les outils BIM actuels montrent effectivement des limites quant à la prise en compte des informations concernant les ESQ_L identifiées. À travers l'analyse de différents outils BIM couramment utilisés de nos jours, nous avons réalisé que la plupart de ces outils sont beaucoup plus orientés vers les ouvrages du bâtiment que vers les espaces et que, parmi les outils disponibles actuellement sur le marché, seul Revit permet d'associer aux espaces des paramètres partagés pouvant être d'ordre qualitatif (sous forme textuelle). Toutefois, cet outil n'envisage aucune structuration de ces informations en tant que contraintes de programmation. En marge de son objectif principal, cette étape nous a également permis de nous familiariser avec les différentes fonctionnalités de chaque outil BIM et avec les éventuels plug-ins qui leur sont dédiés. Ce qui nous a permis de construire une idée sur les possibilités et les modalités de proposition de développement fournies par chaque outil.

L'état de l'art a en outre révélé les limites des modèles d'espace existants à décrire les ESQ_L. Notre travail d'analyse a porté sur les modèles d'espace qui ont été proposés durant les trente dernières années et a permis de souligner que, parmi les exigences du programme, la plupart de ces modèles ne prennent en compte, en effet, que les exigences d'ordre quantitatif (ESQ_N) comme les exigences géométriques (ex. surface, hauteur sous plafond) et celles d'occupation (ex. nombre d'occupants, durée d'occupation). Seul le modèle IFC inclut certaines exigences spatiales d'ordre qualitatif (ex. l'usage type d'un espace, la nature de son revêtement). Les exigences qualitatives décrites par le modèle IFC ne représentent que 13% des ESQ_L spécifiées par notre modèle et ne touchent, vraisemblablement, aucune des exigences de topologie spécifiées, bien que celles-ci sont indispensables durant la phase de conception.

Notre recherche a mis au jour un modèle d'espace capable de prendre en compte et de structurer les informations concernant les ESQ_L du programme qui sont quasiment absentes dans tous les modèles d'espace existants. Notre travail d'identification des ESQ_L a représenté l'élément essentiel que nous avons exploité dans la spécification de ce modèle. Nos spécifications ne portent pas uniquement sur les exigences spatiales de la phase de programmation, mais s'étendent à toute l'information autour du concept d'espace architectural utile durant la phase de conception, incluant la topologie des espaces, mais aussi et surtout les concepts d'activité et de d'espace qui constituent les concepts clés permettant d'associer les ESQ_L aux espaces et de représenter l'ensemble dans un même modèle.

Pour mettre en exergue nos spécifications, notre modèle d'espace utilise les entités IFC existantes auxquelles de nouvelles entités et relations ont été ajoutées. Le modèle spécifié n'est pas, bien entendu, le modèle complet des espaces et des exigences spatiales, il représente toutefois un élément de modélisation ouvert qui devrait être amélioré et alimenté par d'autres valeurs d'exigences.

Cette étude a également apporté une première réponse quant à la prise en compte des ESQ_L dans les pratiques BIM courantes. Vu les limites des formats BIM existants à prendre en compte l'information sur ces exigences, nous nous sommes basés sur notre modèle d'espace pour développer une nouvelle approche qui permet d'intégrer et de représenter les ESQ_L dans un outil BIM (Revit) et de vérifier ainsi une certaine conformité de la conception. Cette approche permet d'assister aussi bien le concepteur dans sa quête de réponse architecturale (conception et évaluation), que le programmiste dans la désignation de ses exigences et leur affectation aux espaces. Notre approche se base sur une saisie des ESQ_L sous forme numérique reconnaissable par l'outil BIM et assure ensuite leur intégration et leur vérification à travers un ensemble de scripts (Dynamo) développés à cet effet.

À travers l'approche développée, nous ne prétendons pas avoir trouvé la réponse optimale à l'intégration des ESQ_L dans les pratiques BIM, mais plutôt une première piste d'intégration possible. Cette piste touche à ce stade à un seul outil BIM, certes, mais nécessite encore du travail pour être améliorée, et pourquoi pas, être généralisée. Nous nous inscrivons clairement dans un processus long et délicat qui ne fait que commencer.

Ce travail de recherche a enfin prouvé l'utilité de la prise en compte des ESQ_L dans la démarche BIM. L'expérimentation pédagogique de l'approche développée face à l'approche habituelle de conception a permis de mettre en exergue l'apport de notre approche, non seulement en matière de respect des exigences, mais aussi en matière de gain de temps de conception. Le travail d'expérimentation a été suivi d'une étape d'inspection et d'évaluation en retour d'expériences. Cette dernière étape a été très utile pour s'assurer du bon déroulement des expériences dans le respect du protocole défini, mais également de l'absence de failles dans l'utilisation de l'approche développée.

Nous sommes convaincus que cette approche doit être à présent expérimentée à plus grande échelle pour déterminer comment cette piste de résolution de l'intégration des ESQ_L dans le BIM devrait être améliorée, mais aussi comment notre proposition de modèle d'espace devrait évoluer à l'avenir.

En conclusion de ce mémoire, il nous semble important de souligner que la prise en compte des informations concernant le bâtiment en phase de programmation architecturale dans le processus BIM reste encore peu abordée et que les approches traditionnelles de consultation et de vérification des informations doivent être remplacées par des méthodes numériques plus précises et plus fiables qui pourraient garantir des méthodes de conception plus cohérentes et plus optimisées.

Perspectives de recherche

Ce travail de recherche ouvre un large spectre de recherche et de vastes études complémentaires pourraient en être inspirées. Nous évoquons d'abord les perspectives qui pourraient venir améliorer et prolonger notre approche, pour s'attarder ensuite sur les perspectives de recherche qui pourraient être envisagées à court terme, mais aussi à long terme.

Tout d'abord, les règles de vérification proposées restent des exemples de règles peu complets. Approfondir la recherche sur la définition des règles de vérification pourrait permettre de vérifier encore plus de valeurs d'exigences, puisque nous sommes parvenus à vérifier environ 16% des ESQ_L qui ont été intégrés à Revit (8 scripts de vérification sur une cinquantaine de valeurs d'exigences intégrées). Du travail reste à faire pour parvenir à vérifier encore plus de valeurs d'exigences. De plus, notre approche se base sur une visualisation des résultats de vérification en 2D et par niveau. Prévoir une visualisation des résultats en 3D sur l'ensemble du projet pourrait représenter une amélioration de l'approche développée vers un processus de vérification beaucoup plus rapide proposant une vérification générale de tout le projet en un seul clic. Il ne faut pas nier qu'un processus de vérification par niveau se montre très contraignant dans le cas de constructions qui s'étalent sur plusieurs étages. Cet aboutissement nécessite d'approfondir encore les recherches en programmation visuelle afin de pouvoir afficher les pièces en couleur sur la vue en 3D.

➤ Perspectives à court terme

Une première perspective se manifeste dans la combinaison de notre approche avec l'un des outils de programmation architecturale existants, pour faire évoluer ses fonctionnalités le long du processus de conception, afin de constituer également un outil d'assistance et d'accompagnement de la conception. L'outil dRofus en est un exemple concret, puisqu'il partage la même démarche de vérification que celle de notre approche (associer les exigences aux espaces, puis ajouter les espaces à Revit et vérifier ensuite). Nous rappelons que cet outil ne permet de vérifier, à présent, que les exigences spatiales quantitatives (ESQ_N) et les exigences spatiales qualitatives d'ordre réglementaire (figure 26). La combinaison de notre approche avec cet outil pourrait étendre son volet de vérification pour couvrir un large spectre des ESQ_L identifiées par notre étude (exigences d'accessibilité, de topologie et de confort). Cette perspective pourrait assurer la pérennité de notre approche et sa généralisation sur plusieurs outils BIM.

Une deuxième perspective à court terme qui se trouve plus orientée vers l'informatique consiste en la proposition d'un plug-in Revit permettant d'automatiser la vérification des ESQ_L. Il est possible de commencer par le développement d'un premier Plug-In basé sur la démarche fonctionnelle de notre approche de conception, en se référant au guide de création de premiers plug-in Revit « My First Plug-in », qui est un guide didactique personnalisé qui assure une introduction en douceur au monde de la programmation (une maîtrise des langages de programmation C# ou VB.NET est toutefois nécessaire). Le partage de ce premier Plug-in dans Autodesk App Store ⁹³ avec les différents professionnels du secteur AEC utilisant Revit, permettrait d'avoir des retours très enrichissants pouvant inspirer l'évolution de notre approche.

➤ Perspectives à long terme

Des perspectives sont à envisager en ce qui concerne la prise en compte et la vérification des ESQ_L subjectives (ex. *très proche de, bien ouvert sur l'extérieur*), couramment présentes dans les documents de programmation architecturale. La définition de différentes échelles de valeurs d'exigences (ex. *très proche / assez proche / peu proche / loin*) et leur vérification à travers l'utilisation des modèles flous ou encore des systèmes d'inférence semblent représenter des pistes de résolutions bien efficaces, mais qui restent bien loin de la portée de ma formation d'architecte. La vérification des ESQ_L subjectives pourrait constituer ainsi une problématique intéressante en collaboration avec d'autres travaux de recherche encore plus orientés vers l'informatique.

Pour illustrer les exigences spatiales, les documents de programmation architecturale contiennent généralement des descriptifs textuels, des schémas, des organigrammes fonctionnels, des tableaux de surfaces, des fiches d'espaces, etc. La variation de la manière dont ces éléments sont présentés d'une étude de programmation à une autre représente une véritable contrainte au travail du concepteur. Celui-ci, dès qu'il commence à s'habituer à une forme de représentation, se retrouve au point de départ avec un nouveau programme architectural et une nouvelle forme de présentation. La situation devient, bien évidemment, plus contraignante quand le concepteur est impliqué dans la conception de plusieurs projets en parallèle, ce qui est souvent le cas. Dans ce contexte, il serait intéressant de définir un formalisme associé à un service en ligne standardisé qui permet de générer, à partir de documents de programmation architecturale, les données des exigences (Excel) intégrables dans l'outil BIM.

⁹³ <https://apps.autodesk.com/fr>

Dans la continuité de cette dernière problématique d'assistance à la programmation, une autre alternative se manifeste dans la proposition d'un outil de représentation graphique de schémas et d'organigrammes fonctionnels qui pourrait faciliter l'acquisition des contraintes précisées par les programmistes de la part des concepteurs. Si un tel outil pouvait fournir des organigrammes modélisables par l'outil BIM, cette alternative pourrait constituer un lien pertinent entre les exigences fonctionnelles, forcément qualitatives, du programme et les fonctionnalités de conception de volume « In-Situ » récemment proposées par certains outils BIM, à l'image de Revit (version 2018). Cette approche de conception serait avant-gardiste, puisqu'elle tend à repenser catégoriquement la manière actuelle de concevoir. En effet, en concevant l'architecte pense en termes d'espaces, mais il agit sur les ouvrages pour délimiter les vides destinés à accueillir les espaces (Siala 2016). Cette problématique a d'ailleurs été présente depuis les temps de la conception manuelle, où la conception a toujours été avant tout une question de dessin d'ouvrages. Dans ce contexte, utiliser les avancées du BIM pour aborder une nouvelle approche de conception qui marque une coupure avec ces pratiques et qui instaure une conception par espaces, représenterait une problématique intéressante et un défi à relever dans de futurs travaux de recherche. De tels liens entre la phase de programmation et celle de conception font de toute évidence partie des clés permettant d'approfondir de façon pérenne la couverture du BIM sur tout le cycle de vie du bâtiment.

GLOSSAIRE

- BIM** : Building Information Model, Modeling ou Management
- CAO / CAD** : Conception assisté par ordinateur / Computer Aided Design
- CAAD** : Computer Aided Architectural Design
- ESQ_L** : Exigences Spatiales Qualitatives
- ESQ_N** : Exigences Spatiales Quantitatives
- IFC** : Industry Foundation Classes
- MEP** : Mécanique, électricité, plomberie
- MVD** : Model View Definitions

LISTE DES PUBLICATIONS

- Dates** **Mai 2017**
Lieu Paris, France
Nom Séminaire MAP
Thèmes Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine
Type de communication Poster
Intitulé « *Prise en compte des exigences spatiales dans les pratiques BIM* »
Auteurs Aida Siala, Gilles Halin, Najla Allani, Mohamed Bouattour
- Dates** **Avril 2017**
Lieu Cardiff, Wales, United Kingdom
Nom Symposium RIS eCAADe 2017
Thèmes The virtual and the physical
Type de communication Article
Pages 65-72
Intitulé « *Architectural space from virtual to physical* »
Auteurs Aida Siala, Najla Allani, Mohamed Bouattour, Gilles Halin
- Dates** **Septembre 2016**
Lieu ENSA Toulouse, France
Nom Conférence SCAN 2016
Thèmes Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet
Type de communication Article
Pages 237-246
Intitulé « *Donner un sens à l'espace architectural, vers une intégration de la dimension sensible de l'architecture dans les pratiques BIM* »
Auteurs Aida Siala, Najla Allani, Gilles Halin, Mohamed Bouattour
- Dates** **Aout 2016**
Lieu École d'Architecture d'Oulu, Oulu Finlande
Nom Conférence eCAADe 2016
Thèmes Complexity & Simplicity
Type de communication Article
Pages 653-662
Intitulé « *Toward space oriented BIM practices* »
Auteurs Aida Siala, Najla Allani, Gilles Halin, Mohamed Bouattour
- Dates** **Juin 2014**
Lieu CRP Henti Tudor, Luxembourg
Nom Conférence SCAN'14
Thèmes Interaction(s) des maquettes numériques
Type de communication Article
Pages 71-80
Intitulé « *Modélisation de la notion d'espace dans le contexte de la coopération numérique* »
Auteurs Aida Siala, Mohamed Bouattour, Bilel Grissa

Dates **Mai 2014**
Lieu ENAU Tunis, Tunisie
Nom Colloque 01-Design 9
Thèmes Conception et réutilisation
Type de communication Poster
Intitulé *«Re-création conceptuelle fondée sur la sémantique des objets »*
Auteurs Aida Siala, Mohamed Bouattour
Observations 1^{er} Prix scientifique

BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed, N. C. (2015). Fully Bayesian learning and spatial reasoning with flexible human sensor networks. *Proceedings of the ACM/IEEE Sixth International Conference on Cyber-Physical Systems* (pp. 80-89). Seattle, Washington: ACM.
- Aish, R. J. (2018). Topologic: tools to explore architectural topology. *Advances in Architectural Geometry* (pp. 316-341). Gothenburg, Sweden: Klein Publishing GmbH.
- Anonymous. (2004). Information requirements specification – [AR-5] early design. *International Alliance for Interoperability*. UK Chapter.
- Arangarasan, R. G. (2000). Geometric modeling and collaborative design in a multi-modal multi-sensory virtual environment. *ASME 2000 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering* (pp. 10-13). Baltimore, Maryland: ASME.
- Azhar, S. N. (2008). Building Information Modeling (BIM): A new paradigm for visual interactive modeling and simulation for construction projects. *Proc., First International Conference on Construction in Developing Countries (Vol. 1)*, 435-446.
- Bardin, L. (1997). *L'analyse de contenu (Vol. 69)*. Paris: Presses universitaires de France.
- Barekati, E. (2014). A Universal Format for Architectural Program of. *Fusion*, (pp. 385-394). Newcastle.
- Barekati, E. (2016). *A BIM compatible schema for architectural programming*.
- Barekati, E. (2015). A BIM-compatible schema for architectural programming information. *International Conference on Computer-Aided Architectural Design Futures* (pp. 311-328). Berlin: Springer.
- Baudouï, R. (1988). Marcel Poète et Le Corbusier: L'histoire dans le projet d'urbanisme. *Les Annales de la recherche urbaine (Vol. 37, No. 1)*, 46-54.
- Becerik-Gerber, B., Rice, S. (2010). The perceived value of building information modeling in the US building industry. *Information Technology in Construction (ITcon) 15*, 185-201.
- Bhatt, M. (2014). The 'Space' in Spatial Assistance Systems: Conception, Formalisation and Computation. Dans T. W. Tenbrink, *Representing Space in Cognition: Interrelations of behaviour*,

language, and formal models (pp. 1-32). Oxford: Oxford University Press.

- Bjork, B. C. (1992). A conceptual model of spaces, space boundaries and enclosing structures. *Automation in Construction*, 1(3), 193-214.
- Borrmann, A. K. (2018). Building Information Modeling: Why? What? How? Dans A. K. Borrmann, *Building Information Modeling. technology Foundations and Industry Practice* (pp. 1-24). Cham: Springer.
- Bouattour, M. (2005). *Assistance à la conception coopérative fondée sur la sémantique des ouvrages. Application au domaine du bois*.
- Boudon, P. (2003). *Sur l'espace architectural*. Paris: Dunod.
- Brucker, B. A. (2005). Initiating the building information model from owner and operator criteria and requirements. *Computing in Civil Engineering*, 1-12.
- Cohn, A. G. (2001). Qualitative spatial representation and reasoning: An overview. *Fundamenta informaticae* 46, 1-29.
- Corinne, B., Laabid, H. (2001, Septembre). Espace et Temps, seuil et proximité. *Les annales de la recherche urbaine*, pp. 126-129.
- Dagnelie, P. (2012). *Principes d'expérimentation. Planification des expériences et analyse de leurs résultats*. Gembloux: Les presses agronomiques de Gembloux.
- De Luca, L. V. (2006). Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach. *Computers & Graphics*, 30(2), 160-176.
- De Luca, L. V. (2007). A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements. *The Visual Computer*, 23(3), 181-205.
- Deering, M. (1995). A Virtual Reality Sketching / Animation Tool. *ACM transactions on Computer Human Interaction*, 2(3), 220-238.
- East, . W. (2007). *Construction operations building information exchange (COBie)*. ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER CHAMPAIGN IL CONSTRUCTION ENGINEERING RESEARCH LAB.
- East, W. (2012). *Building Programming information exchange (BPie)*. BuildingSmartAlliance.
- East, W. (2009). Spatial Compliance information exchange (SCie). Dans *BuildingSMARTAlliance*.
- Eastman, C. S. (1995). A generic building product model incorporating building type information. *Automation in construction* 3(4), 283-304.

- Ekholm, A., Fridqvist, S. (2000). A concept of space for building classification, product modelling, and design. *Automation in Construction*, 9(3), 315-328.
- Ellis, C. a. (1994). A Conceptual Model of Groupware. *CSCW 94, ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, (pp. 79-88). North Carolina, USA.
- Fukuda, T. H. (2018). FBSMAP: The Spatial Representation Method for Intelligent Semantic Service in Indoor Environment. *Proceedings of the 23rd CAADRIA Conference, V2*, 587-596.
- Bachelard, G. (1957). *La poétique de l'espace*. Paris: Vrin.
- Grilo, A., Jardim-Goncalves, R.,- (2010). Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Automation in construction*, 19(5), 522-530.
- Halin, G., Gallas MA. (2016). Une approche pédagogique par les modèles pour la sensibilisation au concept de BIM (Maquette Numérique). *Séminaire de Conception Architecturale Numérique SCAN'16*, (pp. 85-96). Toulouse.
- Halin, G. (2004). Modèles et outils pour l'assistance à la conception. Application à la conception architecturale. *Habilitation à Diriger les Recherches*. Nancy: Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Hardin, B., McCool, D. (2015). *BIM and construction management: proven tools, methods, and workflows*. John Wiley & Sons.
- Hardin, B. (2009). *BIM and Construction Management: proven Tools, Methods, and Workflows*. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing Inc. .
- Hyun, L. O. (2016). The language of design: Spatial cognition and spatial language in parametric design. *International Journal of Architectural Computing (V.14)*, 277-288.
- Ireland, T. (2015). An Artificial Life Approach to Configuring Architectural Space. *Future Trajectories*, (pp. 581-590). Vienna, Austria.
- Kagermann, H. J. (2013). *Recommendations for Implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0; final report of the Industrie .* Forschungsunion.
- Raboudi K., Bensassi, A. (2014). Génération de volumes de contrôle solaire. *Interaction(s) des maquettes numériques : Acte du Séminaire de Conception Architecturale Numérique* (pp. 221-231). Luxembourg: Presses universitaires de Nancy.
- Kim, T. W. (2015). Automated updating of space design requirements connecting user activities and space types. *Automation in Construction*, 50, 102-110.

- Kiviniemi, A. (2005). *Requirement Management Interface to Building Product Models*. CIFE technical report 161, Stanford University.
- Lédeczi, Á. B. (2001). Composing domain-specific design environments. *Computer*, 34(11), 44-51.
- Macher, H. (2017). *Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : Reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants*.
- Moinfar, M. D. (1975). *Bibliographie des travaux d'Emile Benveniste (Extrait des Mélanges Linguistiques Offerts à Emile Benveniste)*. Paris: Editions Peeters.
- Myung, S., Han, S. (2001). Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method. *Expert Systems with applications*, 21(2), 99-107.
- Paillé, P., ucchielli, A. . (2016). *L'analyse qualitative en sciences humaines et sociales-4e éd.* Armand Colin.
- Poincaré, H. (1895). L'espace et la géométrie. . *Revue de métaphysique et de morale*, 3, 631-646.
- Robert, AD., Bouillaguet, A. (1997). *L'analyse de contenu*. Presses universitaires de France.
- Siala & al., 1. (2016). Toward Space Oriented BIM Practices. *eCAADe* (pp. 653-662). Oulu, Finland: Oulu School of architecture .
- Siala & al., 1. (2017). Architectural space from virtual to physical. *Symposium RIS eCAADe* (pp. 65-72). Cardiff, Wales UK: eCAADe, Brussels and the Welsh School of Architecture, Cardiff University.
- Siala & al., 2. (2016). Donner du sens à l'espace architectural. Vers une intégration de la dimension sensible de l'architecture dans les pratiques BIM. *SCAN* (pp. 237-246). Toulouse: PUN-Editions Universitaires de Lorraine.
- Siala & al., 2. (2017). Prise en compte des exigences spatiales qualitatives dans les pratiques BIM. *Séminaire MAP*. Paris.
- Siala, A. &. (2014). Modélisation de la notion d'espace dans le contexte de la coopération numérique. *SCAN* (pp. 71-80). Luxembourg: PUN-Editions Universitaires de Lorraine.
- Siala, A. &. (2014). Re-création conceptuelle fondée sur la sémantique des objets. *0.1-Design*. Tunis.
- Steel, J. D. (2012). Model interoperability in building information modelling. *Software & Systems Modeling*, 99-109.
- Student. (1908). The probable error of a mean. *Biometrika*, 1-25.
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Succar, B.*

(2009). *Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders*. *Automation in construction*, 18(3), 357-375.

Wanlin, P. (2007). L'analyse de contenu comme méthode d'analyse qualitative d'entretiens: une comparaison entre les traitements manuels et l'utilisation de logiciels. *Recherches qualitatives*, 243-272.

Weldu, Y. W. (2012). Automated generation of 4D building information models through spatial reasoning. *Construction research congress* (pp. 612-621). Indiana, United States: ASCE, USA.

Zuppa, D. I. (2009). BIM's impact on the success measures of construction projects. *Computing in Civil Engineering*, 503-512.

ANNEXES

Annexe 1 : Grilles de catégorisation des exigences de topologie et de confort

Annexe 2 : Grille d'analyse des ESQ_L

Annexe 3 : Grille d'analyse des ESQ_L avec pourcentages mesurant l'apparition des qualificatifs

Annexe 4 : Exigences spatiales définies par le format IFC (5.1)

Annexe 5 : Feuilles du tableau des exigences (Excel)

Annexe 6 : Règles de vérification

Annexe 7 : Enoncé du test de niveau

Annexe 8 : Classement des participants selon les résultats du test de niveau

Annexe 9 : Enoncé du projet de l'expérimentation

Annexe 10 : Fiche de suivi de l'expérimentation

Annexe 11 : Exemple de rendu de chaque groupe (avec et sans prototype)

Annexe 1 : Grilles de catégorisation des exigences de topologie et de confort

EXIGENCE			DESCRIPTEUR		
Type	Catégorie	Famille	Mot	Nature	Qualificatif (s)
Topologie	Relation	Liaison	<i>liaison lié</i>	Type de relation	<i>directe / indirecte directe / indirecte intérieure</i>
		Relation	<i>relation relié</i>	Caractéristique	<i>visuelle physique / virtuelle avec extérieur</i>
			<i>séparation</i>	Contrainte	<i>séparation H/F, usagers</i>
	Distribution	Distribution	<i>distribution distribué</i>	Type de distribution	<i>fréquente / occasionnelle horizontale / verticale</i>
		Circulation	<i>circulation circuler va et viens</i>	Type de circulation	<i>publique / privée</i>
	Caractéristique		<i>propre / sale</i>		
	Contrainte		<i>réglementaire, normes</i>		
	Disposition	Proximité	<i>proximité proche</i>	Caractéristique	<i>à proximité de / loin de proche de</i>
Contiguïté		<i>contiguïté</i>	Caractéristique	<i>contiguë à, contiguës espace contiguë</i>	

Grille de catégorisation des exigences de topologie avec détails des descripteurs

EXIGENCE			DESCRIPTEUR		
Type	Catégorie	Famille	Mot	Thème	Qualificatif (s)
De Confort	Thermique	Climatisation	<i>climatisation</i> <i>climatisé</i>	Caractéristique	<i>climatisé, non climatisé</i> <i>adapté, optimisé</i>
				Contrainte	<i>règlement, normes</i>
		Chauffage	<i>chauffage</i> <i>chauffé</i>	Contrainte	<i>chauffé, non chauffé, isolé</i> <i>à forte puissance</i>
				Type de chauffage	<i>chaufferie bois, chauffe-eau,</i> <i>électrique</i>
		Rafrâichissement	<i>rafrâichissement</i>	Caractéristique	<i>nécessaire</i>
Acoustique		Acoustique	<i>Acoustique</i>	Caractéristique	<i>optimisée, performante,</i> <i>soigné, de qualité</i>
		Phonique	<i>phonique</i> <i>sonore</i>	Contrainte	<i>normalisé, standardisé</i> <i>avec espace</i>
				Caractéristique	<i>adaptée</i>
Lumiseuse	Éclairage	Éclairage	<i>éclairage</i> <i>éclairé</i>	Type d'éclairage	<i>naturel / artificiel</i> <i>zénithal</i> <i>direct / indirect</i> <i>intérieur / extérieur</i>
				Caractéristique	<i>homogène / ponctuel</i> <i>éclairé, pas éclairé</i> <i>fluorescent</i> <i>diurne, nocturne</i> <i>de secours, de sécurité</i>
				Contrainte	<i>règlement, normes</i>
				Lumière	<i>lumière</i>
			Esoleillement	<i>ensoleillé</i> <i>ensoleillement</i>	Caractéristique
				Type	<i>ensoleillement direct</i>
Hygrométrique	Ventilation		<i>ventilation</i> <i>VMC</i> <i>extraction</i> <i>hygrométrie</i>	Type de ventilation	<i>naturelle / mécanique</i> <i>diurne / nocturne</i> <i>primaire / secondaire</i>
				Caractéristique	<i>Suffisante, efficace, fiable</i> <i>renforcée, performante</i>
				Contrainte	<i>réglementation, normes</i>
				Caractéristique	<i>hygiénique</i>
Sécurité	Sécurité		<i>sécurité</i> <i>intrusion</i> <i>incendie</i> <i>secours</i>	Caractéristique	<i>adéquate, assurée, adaptée</i>
				Contrainte	<i>réglementaire, normes</i>
				Caractéristique	<i>renforcée</i>
				Contrainte	<i>réglementaire, normes</i>

Grille de catégorisation des exigences de confort avec détails des descripteurs

Annexe 2 : Grille d'analyse des ESQ

EXIGENCE			DESCRIPTEUR				
Type	Catégorie	Famille	Mot	Nature	Qualificatif (s)		
Accessibilité	Accessibilité	Accès	<i>accès</i> <i>accessible</i> <i>accéder</i>	Type d'accès	<i>principal / secondaire</i> <i>intérieur / extérieur</i>		
				Caractéristique	<i>depuis</i>		
			Contraintes	<i>type de points d'accès</i>			
				Entrée	<i>entrée</i>	Type d'entrée	<i>direct / indirect</i>
				Sortie	<i>sortie</i> <i>sorties</i>	Type de sortie	<i>privé / public</i>
				Evacuation	<i>évacuation</i> <i>évacuer</i>	Type d'évacuation	<i>sécurisé, contrôlé</i>
						Caractéristique	<i>de secours,</i> <i>de service, de livraison</i>
				Passage	<i>passage</i>	Type de passage	<i>indépendant</i>
						Contrainte	<i>réglementaire, normes usagers, handicapés</i>
		Topologie	Relation	Liaison	<i>liaison</i> <i>lié</i>	Type de relation	<i>directe / indirecte</i> <i>directe / indirecte</i> <i>intérieure</i>
Relation	Caractéristique					<i>visuelle</i> <i>physique / virtuelle</i> <i>avec extérieur</i>	
	Contrainte					<i>séparation H/F, usagers</i>	
Distribution	Distribution			<i>distribution</i> <i>distribué</i>	Type de distribution	<i>fréquente / occasionnelle</i> <i>horizontale / verticale</i>	
	Circulation			<i>circulation</i> <i>circuler</i> <i>va et viens</i>	Type de circulation	<i>publique / privée</i>	
					Caractéristique	<i>propre / sale</i>	
					Contrainte	<i>réglementaire, normes</i>	
Disposition	Proximité			<i>proximité</i> <i>proche</i>	Caractéristique	<i>à proximité de / loin de</i> <i>proche de</i>	
	Contiguïté			<i>contiguïté</i>	Caractéristique	<i>contiguë à, contiguës</i> <i>espace contiguë</i>	
Confort	Thermique			Climatisation	<i>climatisation</i> <i>climatisé</i>	Caractéristique	<i>climatisé, non climatisé</i>
		Contrainte	<i>règlement, normes</i>				
		Chauffage	<i>chauffage</i> <i>chauffé</i>	Contrainte	<i>chauffé, non chauffé, isolé</i>		
				Type de chauffage	<i>chaufferie bois, chauffe-eau, électrique</i>		
				Contrainte	<i>règlement, normes</i>		
	Acoustique	Phonique	<i>phonique</i>	Contrainte	<i>normalisé, standardisé</i> <i>avec espace</i>		
	Lumiseuse	Éclairage	<i>éclairage</i> <i>éclairé</i>	Type d'éclairage	<i>naturel / artificiel</i> <i>zénithal</i> <i>direct / indirect</i> <i>intérieur / extérieur</i>		
					Caractéristique	<i>homogène / ponctuel</i> <i>éclairé, pas éclairé</i> <i>fluorescent</i> <i>diurne, nocturne</i> <i>de secours, de sécurité</i>	
						Contrainte	<i>règlement, normes</i>
					Lumière	<i>lumière</i>	Caractéristique
				Esoleillement	<i>ensoleillement</i>	Type	<i>ensoleillement direct</i>
Hygrométrique	Ventilation	<i>ventilation</i> <i>VMC</i> <i>extraction</i>	Type de ventilation	<i>naturelle / mécanique</i> <i>diurne / nocturne</i> <i>primaire / secondaire</i>			
Sécurité	Sécurité	<i>intrusion</i>	Contrainte	<i>réglementaire, normes</i>			
	Secours	<i>secours</i>		<i>réglementaire, normes</i>			

Annexe 3 : Grille d'analyse des ESQ avec pourcentages mesurant l'apparition des qualificatifs

EXIGENCE					DESCRIPTEUR										
Type	Catég.	Corpus 1		Corpus 2		Corpus 1		Corpus 2		Qualificatif (s)	Corpus 1		Corpus 2		
		Freq.	%	Freq.	%	Freq.	%	Freq.	%		Freq.	%	Freq.	%	
EXIGENCES D'ACCESSIBILITÉ	Accessibilité	463	100%	509	100%	Type d'accès	303	65%	334	66%	principal / secondaire	138	46%	148	44%
											intérieur / extérieur	96	32%	111	33%
											direct / indirect	12	4%	13	4%
											privé / public	22	7%	24	7%
						Caractéristique	77	17%	81	16%	sécurisé, contrôlé	29	10%	32	10%
											indépendant	6	2%	6	2%
											depuis	37	48%	39	48%
						Contrainte	83	18%	94	18%	à proximité de	23	30%	24	30%
											de secours,	2	3%	2	2%
											de service, de livraison	15	19%	16	20%
EXIGENCES DE TOPOLOGIE	Relation	95	33%	105	33%	Type de relation	67	71%	74	70%	directe / indirecte	42	63%	46	62%
											principale / secondaire	25	37%	28	38%
						Caractéristique	28	29%	31	30%	visuelle	13	46%	14	45%
											physique / virtuelle	2	7%	2	6%
	Distribution	77	26%	85	27%	Type	48	62%	54	64%	avec extérieur	13	46%	15	48%
											fréquente / occasionnelle	20	42%	23	43%
											horizontale / verticale	23	48%	26	48%
						Caractéristique	13	17%	13	15%	publique / privée	2	4%	2	4%
											intérieure	3	6%	3	6%
											propre / sale	13	100%	13	100%
Contrainte	16	21%	18	21%	séparation H/F, usagers	14	88%	16	89%						
					réglementaire, normes	2	13%	2	11%						
Disposition	120	41%	128	40%	Contrainte	120	100%	128	100%	à proximité de / loin de,	89	74%	92	72%	
										proche de	11	9%	12	9%	
										contiguë à, contiguës	20	17%	24	19%	
EXIGENCES DE CONFORT	Thermique	90	7%	98	7%	Type	6	7%	6	6%	chaufferie bois, chauffe-eau, électrique	6	100%	6	100%
											climatisé / non climatisé,	64	76%	70	76%
	Acoustique	141	11%	156	11%	Contrainte	141	100%	156	100%	règlementation, normes	138	98%	147	94%
											avec espace	3	2%	9	6%
	Lumiseuse	688	55%	785	56%	Type	577	84%	661	84%	naturel / artificiel	363	63%	414	63%
											zénithal	3	1%	3	0%
											direct / indirect	34	6%	41	6%
											intérieur / extérieur	13	2%	13	2%
											homogène / ponctuel	105	18%	125	19%
											fluorescent	12	2%	12	2%
Contrainte						10	1%	10	1%	ensileillement direct	45	8%	51	8%	
										diurne, nocturne	2	0%	2	0%	
Caractéristique	101	15%	114	15%	réglementation, normes	10	100%	10	100%						
					éclairé / non éclairé	3	3%	4	4%						
					de secours, de sécurité	18	18%	21	18%						
Couleur	2	2%	2	2%	Couleur	2	2%	2	2%						
					décorative, d'ambiance	78	77%	87	76%						

Hygrométrie	279	22%	291	21%	Type de ventilation	223	80%	230	79%	naturelle / mécanique	202	91%	206	90%
										diurne / nocturne	19	9%	22	10%
										primaire / secondaire	2	1%	2	1%
						Contrainte	56	20%	61	21%	réglementation, normes	56	100%	61
Sécurité	56	4%	62	4%	Contrainte	56	100%	62	100%	réglementation, normes	56	100%	62	100%

Annexe 4 : Exigences spatiales définies par le format IFC


EXIGENCE	NOM	TYPE	INDICATION
COMMUNE	Reference	<i>IfcIdentifier</i>	Référence l'identifiant d'un type d'espace
	IsExternal	<i>IfcBoolean</i>	Sin l'espace doit être extérieur (vrai ou faux)
	GrossPlannedArea	<i>IfcAreaMeasure</i>	Surface brute demandée
	NetPlannedArea	<i>IfcAreaMeasure</i>	Surface nette demandée
	PubliclyAccessible	<i>IfcBoolean</i>	si l'espace doit être accessible au public
	HandicapAccessible	<i>IfcBoolean</i>	S'il doit être accessible aux handicapés
DE REVETEMENT	FloorCovering/ WallCovering/ CeilingCovering/ SkirtingBoard/ Molding/	<i>IfcLabel</i>	Nature des revêtements de plancher / mur / plafond / plinthe / moulure.
	FloorCoveringThickness/ WallCoveringThickness/ CeilingCoveringThickness/ SkirtingBoardHeight/ MoldingHeight/	<i>IfcPositive LengthMeasure</i>	Epaisseur ou hauteur de la couche de revêtement
	ConcealedFlooring/ ConcealedCeiling/	<i>IfcBoolean</i>	Si l'espace comprend un faux plancher / un faux plafond
	ConcealedFlooringOffset/ ConcealedCeilingOffset/	<i>IfcNonNegative LengthMeasure</i>	Distance entre la dalle et le revêtement de sol / le plancher et le faux plafond
	OccupancyType	<i>IfcLabel</i>	Usage type de l'espace
	OccupancyNumber	<i>IfcCountMeasure</i>	Nombre d'occupants
OccupancyNumberPeak	<i>IfcCountMeasure</i>	Nombre maximum d'occupants simultanés	
OccupancyTimePerDay	<i>IfcTimeMeasure</i>	Durée journalière de l'activité dans cet espace	
AreaPerOccupant	<i>IfcAreaMeasure</i>	Taux d'occupation de l'espace pour ce type d'usage	
MinimumHeadroom	<i>IfcLengthMeasure</i>	Hauteur de passage requise	
IsOutlookDesirable	<i>IfcBoolean</i>	si la vue sur l'extérieur est souhaitable	


DE SECURITE INCENDIE	FireRiskFactor	<i>IfcLabel</i>	Facteur de risque incendie de l'espace, selon la réglementation locale
	FlammableStorage	<i>IfcBoolean</i>	Si l'espace est destiné au stockage de matières inflammables
	FireExit	<i>IfcBoolean</i>	Si l'espace est conçu pour servir de sortie en cas d'incendie
	SprinklerProtection	<i>IfcBoolean</i>	S'il bénéficie d'une protection par sprinkler ⁹⁴
	SprinklerProtection Automatic	<i>IfcBoolean</i>	S'il bénéficie d'une protection par sprinkler automatique
	AirPressurization	<i>IfcBoolean</i>	si l'espace doit d'être alimenté en air comprimé
LUMINEUSE	ArtificialLighting	<i>IfcBoolean</i>	si l'espace nécessite de l'éclairage artificiel
	Illuminance	<i>IfcIlluminance Measure</i>	Valeur de l'éclairage attendu
THERMIQUE	SpaceTemperature/ SpaceTemperatureMax SpaceTemperatureMin	<i>IfcThermodynamic Temperature Measure</i>	Température voulue, celle maximale et celle minimale
	SpaceTemperatureSummerMax/ SpaceTemperatureSummerMin/ SpaceTemperatureWinterMax/ SpaceTemperatureWinterMin	<i>IfcThermodynamic Temperature Measure</i>	Températures minimales et maximales en été et en hiver
	SpaceHumidity/ SpaceHumidityMax/ SpaceHumidityMin	<i>IfcRatioMeasure</i>	Humidité relative de l'espace, celles minimale et maximale
	SpaceHumiditySummer/ SpaceHumidityWinter	<i>IfcRatioMeasure</i>	Humidité relative de l'espace en été et en hiver
	DiscontinuedHeating	<i>IfcBoolean</i>	si un chauffage intermittent est requis
	NaturalVentilation	<i>IfcBoolean</i>	si la ventilation de l'espace doit être naturelle
	NaturalVentilationRate	<i>IfcCountMeasure</i>	Taux de ventilation naturelle exprimé en volumes par heure

⁹⁴ Une installation fixe d'extinction à eau

	MechanicalVentilationRate	IfcCountMeasure	Taux ventilation mécanique
	AirConditioning	IfcBoolean	si l'espace requiert un conditionnement d'air
	AirConditioningCentral	IfcBoolean	si l'espace requiert un conditionnement d'air centralisé
DE LA CONCEPTION THERMIQUE	CoolingDesignAirflow/ HeatingDesignAirflow	IfcVolumetricFlowRateMeasure	débit d'air requis pendant les pics de refroidissement ou de chauffage
	TotalSensibleHeatGain/ TotalHeatGain/ TotalHeatLoss	IfcPowerMeasure	Energie gagnée/ perdue par l'espace durant les pics de refroidissement ou de chauffage
	TotalHeatLoss	IfcPowerMeasure	Energie perdue par l'espace durant les moments de chauffage maximal
	CoolingDryBulb/ HeatingDryBulb	IfcThermodynamicTemperatureMeasure	Température de bulbe sec à l'intérieur pour la conception de refroidissement / chauffage
	CoolingRelativeHumidity HeatingRelativeHumidity	IfcPositiveRatioMeasure	Humidité relative intérieure pour la conception de refroidissement / chauffage
	VentilationAirFlowrate	IfcVolumetricFlowRateMeasure	Ventilation nécessaire de l'air extérieur
	ExhaustAirFlowrate	IfcVolumetricFlowRateMeasure	débit d'air extrait
	CeilingRAPlenum	IfcBoolean	Si un Plénum de plafond est utilisé pour l'air de retour
	BoundaryAreaHeatLoss	IfcHeatFluxDensityMeasure	Perte de chaleur par unité de surface
DE LA CHARGE THERMIQUE	People	IfcPowerMeasure	Gains et pertes de chaleur dus aux personnes
	Lighting	IfcPowerMeasure	Charge d'éclairage.
	EquipmentSensible	IfcPowerMeasure	Gains et pertes de chaleur liés aux équipements
	VentilationIndoorAir/ VentilationOutdoorAir/ RecirculatedAir/	IfcPowerMeasure	Charge de ventilation de l'air intérieur / extérieur / recyclé

ExhaustAir / AirExchangeRate/ DryBulbTemperature/ RelativeHumidity	IfcPowerMeasure	Charge de l'air échappé / du taux de changement d'air / celle due à la température sèche / celle de l'humidité relative
InfiltrationSensible	IfcPowerMeasure	Gains et pertes de chaleur dues à l'infiltration
TotalSensibleLoad/ TotalLatentLoad/	IfcPowerMeasure	Energie totale ajoutée ou retirée de l'air qui affecte sa température/ son humidité /
TotalRadiantLoad	IfcPowerMeasure	Énergie électromagnétique totale ajoutée ou éliminée par émission ou par absorption

 Exigences quantitatives (29%)

 Exigences qualitatives (71%)

AAA ESQ_L identifiées au chapitre 3, qui sont prises en compte par le modèle IFC.

Annexe 5 : Feuilles du tableau des exigences (Excel)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.5 Accessible de	0.5 Caractère	0.5 Type	0.5 Sécurisé	0.5 Contrôlé	0.5 à proximité	0.5 Pub/Privé	0.5 Usagers	0.5 Autre 1	0.5 Autre 2
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée				Oui	Oui					
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon										
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM	Cuisine	Secondaire								
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour										
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Garage		Intérieur							
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités						Salle à manger				

Figure 1 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences d'accessibilité <Accessibility>

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.6 Naturel	0.6 Artificiel	0.6 Homogène	0.6 Ponctuel	0.6 Décoratif	0.6 Ensoleillement	0.6 Direct	0.6 Indirect	0.6 De sécurité	0.6 Autre 1	0.6 Autre 2
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée					Oui				Oui		
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon					Oui	Oui		Oui			
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM					Oui						
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour						Oui		Oui			
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Oui		Oui	Oui							
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités	Oui								Oui		

Figure 2 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences lumineuses <Lighting>

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.8 Naturelle	0.8 Mécanique	0.8 Diurne	0.8 Nocturne	0.8 Norme	0.8 Autre 1	0.8 Autre 2
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée	Oui						
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon							
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM							
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour							
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Oui	Oui			R. 4722-1		
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités		Oui			R. 4722-1		

Figure 3 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences hygrométriques <Hygrometric>

	A	B	C	D	E	F	G
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.7 Climatisation	0.7 Chauffage	0.7 Norme thermique
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée	Oui	Oui	RT 2012
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon	Oui	Oui	RT 2012
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM	Oui	Oui	RT 2012
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour	Oui	Oui	RT 2012
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Oui	Oui	RT 2012
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités	Oui	Oui	RT 2012

Figure 4 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, fenêtre des exigences thermiques <Thermal>

	A	B	C	D	E
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	0.9 Norme acoustique
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée	
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon	Arrêté du 30 juin 1999
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM	
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour	Arrêté du 30 juin 1999
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités	

Figure 5 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, fenêtre des exigences acoustiques <Acoustic>

	A	B	C	D	E
1	0.1 ID	0.1 Type	0.1 Sous-Type	0.1 Nom	1.0 Norme de sécurité
2	1	Hall de distribution	Hall d'entrée	N Hall d'entrée	Arrêté du 15 octobre 2014
3	2	Espace de jour	Salon	N Salon	Arrêté du 15 octobre 2014
4	3	Espace de jour	Salle à manger	N SAM	
5	4	Espace de jour	Séjour	N Séjour	
6	5	Espace de jour	Cuisine	N Cuisine	Arrêté du 15 octobre 2014
7	6	Point d'eau	Salle d'eau	N SDE invités	

Figure 6 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, fenêtre des exigences de sécurité <Security>

Annexe 6 : Règles de vérification

EXIGENCE				VÉRIFICATION		
Type	Catégorie	Nom de paramètre	Valeur de paramètre	Règle	Démarche de vérification	Nœuds Dynamo utilisés
Confort	Exigences lumineuses	Éclairage naturel	Oui	La pièce contient au moins une ouverture qui donne sur l'extérieur.	<p>Sélectionner la liste des pièces dont le paramètre d'éclairage naturel == Oui ;</p> <p>Pour chaque pièce ;</p> <p>sélectionner la liste des fenêtres et les fonctions des murs hôtes correspondants ;</p> <p>finPour</p> <p>Si liste des fenêtres ≥ 1 ;</p> <p>ET ;</p> <p>Si fonction du mur hôte == Extérieur ;</p> <p>Alors visualiser la pièce en vert ;</p> <p>Sinon visualiser la pièce en rouge ;</p> <p>finSi ;</p> <p>finSi ;</p>	<p>Element.GetPaameterValueByName</p> <p>List.FilterByBoolMask</p> <p>Room.Windows et WallType.Function</p> <p>List.ContainsItem et</p> <p>WallType.Function == Extérieur</p> <p>Element.OverrideColorInView</p> <p>RemoveListFromList, où :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Liste A est la liste des pièces à visualiser en vert - Liste B est la liste des pièces ayant l'exigence d'éclairage naturel
		Ensoleillement	Oui	La pièce contient au moins une ouverture qui donne sur l'extérieur dont le vecteur d'orientation se trouve dans l'intervalle du parcours du soleil au solstice d'hiver en	<p>Sélectionner la liste des pièces dont le paramètre d'ensoleillement == Oui ;</p> <p>Pour chaque pièce ;</p> <p>sélectionner la liste des fenêtres et les fonctions des murs hôtes correspondants ;</p> <p>finPour</p>	<p>Element.GetPaameterValueByName</p> <p>List.AllIndicesOf</p> <p>Room.Windows et WallType.Function</p> <p>List.ContainsItem et</p>

				Tunisie (entre 120° à l'est et 240° à l'ouest).	<p>Pour chaque fenêtre dont fonction de mur hôte == Extérieur ; sélectionner le vecteur d'orientation ; finPour ; Déterminer l'intervalle du parcours du soleil au solstice d'hiver en Tunisie ; [210°-330°] ; Si 210° ≤ vecteur d'orientation ≤ 330° ; Alors visualiser la pièce en vert ; Sinon visualiser la pièce en rouge ; finSi ;</p>	<p>WallType.Function == « Extérieur » FamilyInstance.HandOrientation et Vector.AngleAboutAxis Document.ProjectPostion Code Block : Y≤X && X≤Z, où : - X est le vecteur d'orientation d'une ouverture - Y est l'angle du lever du soleil - Z est l'angle du coucher du soleil Element.OverrideColorInView RemoveListFromList, où : - Liste A est la liste des pièces à visualiser en vert - Liste B est la liste des pièces ayant l'exigence d'ensoleillement.</p>
	Exigences hygrométriques	Ventilation naturelle	Oui	La pièce contient au moins une ouverture qui donne sur l'extérieur.	<p>Sélectionner la liste des pièces dont le paramètre de ventilation naturelle == Oui ; Pour chaque pièce ; sélectionner la liste des fenêtres et les fonctions des murs hôtes correspondants ; finPour ; Si liste des fenêtres ≥1 ; ET ; Si fonction du mur hôte == Extérieur ; Alors visualiser la pièce en vert ; Sinon visualiser la pièce en rouge ; finSi ; finSi ;</p>	<p>Element.GetPaameterValueByName List.FilterByBoolMask Room.Windows et WallType.Function List.ContainsItem et WallType.Function == Extérieur Element.OverrideColorInView RemoveListFromList, où : - Liste A est la liste des pièces à visualiser en vert - Liste B est la liste des pièces ayant l'exigence d'éclairage naturel</p>

Topologie	Exigences de distribution	À partir de et Caractère de distribution (verticale)	Liste de sous-types de pièces	Les pièces desservies et les pièces de distribution n'appartiennent pas au même niveau.	Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être desservies horizontalement ; Pour chaque pièce sélectionner le niveau (1) auquel elle appartient ; finPour ; Sélectionner la liste des pièces à travers lesquelles doit se faire la distribution ; Pour chaque pièce sélectionner le niveau (2) auquel elle appartient ; finPour ; Si niveau (1) == niveau (2) ; Alors visualiser la pièce en vert ; sinon visualiser la pièce en rouge ; finSi ;	<i>Element.GetParameterValueByName</i> <i>Element.GetParameterValueByName</i> <i>Element.GetParameterValueByName</i> <i>Element.GetParameterValueByName</i> == <i>Element.OverrideColorInView</i>
		À partir de et Caractère de distribution (horizontale)	Liste de sous-types de pièces	Les pièces desservies et les pièces de distribution appartiennent au même niveau.	Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être desservies horizontalement ; Pour chaque pièce sélectionner le niveau (1) auquel elle appartient ; finPour ; Sélectionner la liste des pièces à travers lesquelles doit se faire la distribution ; Pour chaque pièce sélectionner le niveau (2) auquel elle appartient ; finPour ; Si niveau (1) == niveau (2) ; Alors visualiser la pièce en rouge ; sinon visualiser la pièce en vert ; finSi ;	<i>Element.GetParameterValueByName</i> <i>Element.GetParameterValueByName</i> <i>Element.GetParameterValueByName</i> <i>Element.GetParameterValueByName</i> == <i>Element.OverrideColorInView</i>

	Exigences de relation	En relation avec	Liste de sous-types de pièces	Les pièces sont en relation directe et partagent un point d'accès, ou elles sont en relation indirecte et reliées à travers une pièce intermédiaire.	<p>Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être en relation ;</p> <p>Pour chaque pièce sélectionner la liste des points d'accès (1);</p> <p>finPour ;</p> <p>Sélectionner la liste des pièces avec lesquelles doit se faire la relation ;</p> <p>Pour chaque pièce sélectionner la liste des points d'accès (2);</p> <p>finPour ;</p> <p>Pour chaque point d'accès (1) sélectionner la liste des pièces intermédiaires accessibles à travers;</p> <p>finPour ;</p> <p>Pour chaque pièce intermédiaire sélectionner la liste des points d'accès (3) ;</p> <p>finPour ;</p> <p>Si la liste des points d'accès (1) et (2) ont un élément en commun ;</p> <p>Ou ;</p> <p>Si la liste des points d'accès (1) et (3) ont un élément en commun</p> <p>Et ;</p> <p>Si la liste des points d'accès (3) et (2) ont un élément en commun</p> <p>Alors visualiser les pièces en vert (les pièces en relation ainsi que celle intermédiaire) ;</p> <p>Sinon visualiser les deux pièces en rouge ;</p> <p>finSi ;</p> <p>finSi ;</p>	<p><i>Element.GetParameterValueByName</i></p> <p><i>Room.Doors</i> et <i>Room.Windows</i> (portes-fenêtres)</p> <p><i>Element.GetParameterValueByName</i></p> <p><i>Room.Doors</i> et <i>Room.Windows</i> (portes-fenêtres)</p> <p><i>List.ContainsItem</i></p> <p><i>Element.OverrideColorInView</i></p> <p><i>Door.Rooms</i> et <i>Window.Rooms</i>, <i>Room.Doors</i>, <i>Room.Windows</i> et <i>List.ContainsItem</i></p> <p><i>If</i></p> <p><i>Element.OverrideColorInView</i></p>
--	-----------------------	------------------	-------------------------------	--	---	--

	Exigences de disposition	Contiguë à	Liste de sous-types de pièces	Les pièces partagent au moins deux murs en commun qui sont perpendiculaires.	<p>Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être en contiguës à d'autres ;</p> <p>Pour chaque pièce sélectionner la liste des murs délimitant (1);</p> <p>finPour ;</p> <p>Sélectionner la liste des pièces auxquelles elles doivent être contiguës ;</p> <p>Pour chaque pièce sélectionner la liste des murs délimitant (2) ;</p> <p>finPour ;</p> <p>Si les listes des murs délimitant (1) et (2) ont deux éléments en commun ;</p> <p>alors sélectionner le vecteur de chaque mur ;</p> <p>Et ;</p> <p>Si vecteur (1) est orthogonal à vecteur (2) ;</p> <p>alors visualiser les deux pièces en vert ;</p> <p>sinon visualiser les deux pièces en rouge ;</p> <p>finSi ;</p>	<p><i>Element.GetParameterValueByName</i></p> <p><i>Room.Boundaries</i></p> <p><i>Element.GetParameterValueByName</i></p> <p><i>Room.Boundaries</i></p> <p><i>Lists.DuplicatedItemIndices</i></p> <p><i>Element.Location, Line.Direction et</i></p> <p><i>Vector.IsOrthogonalToVector</i></p> <p><i>If et Element.OverrideColorInView</i></p>
	Exigences de proximité	À proximité de	Liste de sous-types de pièces	La distance entre les points d'accès des deux pièces ne dépasse pas la limite indiquée (fixée à 5 mètres au niveau de ce travail, mais qui peut être modifiée selon le type de projet).	<p>Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être à proximité d'autres pièces ;</p> <p>Pour chaque pièce sélectionner la localisation des portes ;</p> <p>finPour ;</p> <p>Sélectionner la liste des pièces auxquelles elles doivent être proches ;</p> <p>Pour chaque pièce sélectionner la localisation des portes ;</p> <p>finPour ;</p> <p>Calculer la distance entre les localisations des portes ;</p>	<p><i>Element.GetParameterValueByName</i></p> <p><i>Room.Doors et Element.Location</i></p> <p><i>Element.GetParameterValueByName</i></p> <p><i>Room.Doors et Element.Location</i></p> <p><i>Geometry.DistanceTo et</i></p> <p><i>Code Block : x <= y, où :</i></p>

					<p><i>Si distance ≤ valeur prédéfinie ;</i> Alors visualiser les deux pièces en vert ; Sinon visualiser les deux pièces en rouge ; finSi ;</p>	<p>- x est la distance entre les portes des deux pièces - y est la distance maximale de proximité de 5 mètres (indiquée dans un Number Slider). Element.OverrideColorInView</p>
Accessibilité	Exigences d'accessibilité	Accessible de	Liste de sous-types de pièces	Les deux pièces sont soit totalement ouvertes l'une sur l'autre, soit séparées par un mur tout en gardant un point d'accès partagé (une ouverture de passage ou une porte).	<p>Sélectionner la liste des pièces ayant l'exigence d'être accessibles depuis d'autres pièces ; Pour chaque pièce sélectionner la liste des portes ; finPour ; Sélectionner la liste des pièces qui doivent donner l'accès ; Pour chaque pièce sélectionner la liste des portes ; finPour ; Si les deux listes de portes ont un élément en commun ; alors visualiser les deux pièces en vert ; sinon visualiser les deux pièces en rouge ; finSi ;</p>	<p>Element.GetParameterValueByName Room.Doors Element.GetParameterValueByName Room.Doors List.ContainsItem Element.OverrideColorInView RemoveListFromList, où : - Liste A est la liste des pièces à visualiser en vert - Liste B est la liste des pièces ayant l'exigence d'être verticalement desservies</p>
De surface	De surface	Surface prévue	Surface	La surface de la pièce conçue est égale à la surface prévue par le programme. Avec une marge d'acceptabilité de 12%.	<p>Sélectionner la liste des pièces demandées par le programme ; Pour chaque pièce sélectionner la surface prévue ; finPour ; Sélectionner la liste des pièces conçues ; Pour chaque pièce sélectionner la surface ; finPour ;</p>	<p>Element. GetParameterValueByName Element. GetParameterValueByName Element. GetParameterValueByName Code Block : $x > [y + (y \times 12/100)]$</p>

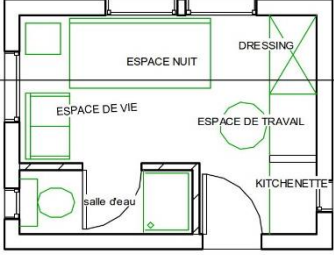
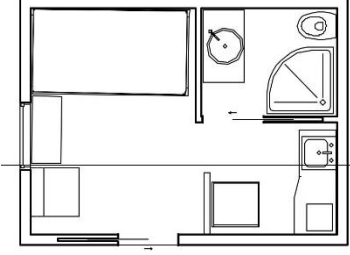
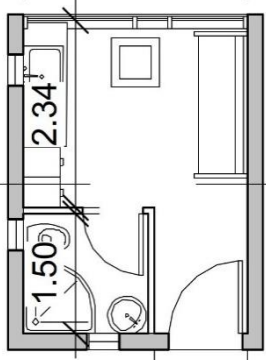
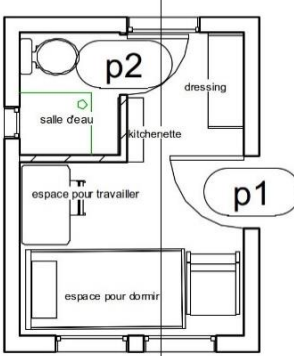
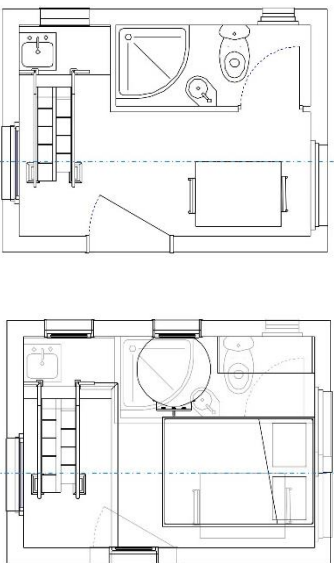
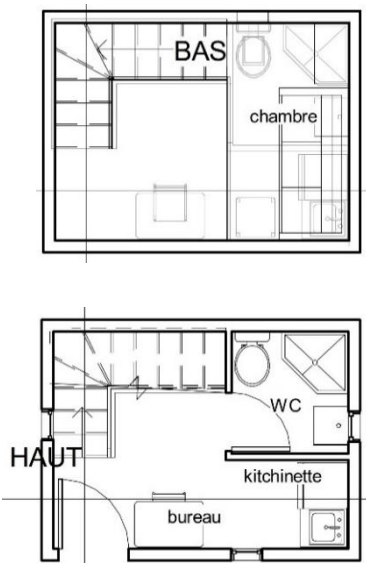
				<p><i>Si la surface conçue est supérieure à celle prévue avec une marge d'acceptabilité⁹⁵ de 12% ;</i></p> <p>alors visualiser la pièces en rouge ;</p> <p>sinon visualiser la pièce en vert ;</p> <p>finSi ;</p> <p><i>Si la surface conçue est inférieure à la surface prévue (marge d'acceptabilité de 12%) ;</i></p> <p>alors visualiser la pièces en rouge claire ;</p> <p>finSi ;</p>	<p>Code Block : $x < [y - (y \times 12/100)]$, où :</p> <ul style="list-style-type: none"> - x est la surface de la pièce dans le modèle conçu, - y est la surface prévue par le programme. <p>Element.OverrideColorInView</p>
--	--	--	--	---	--

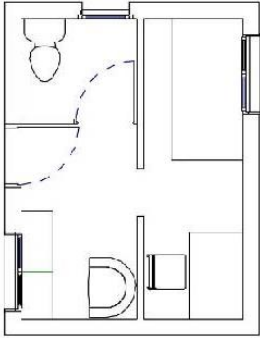
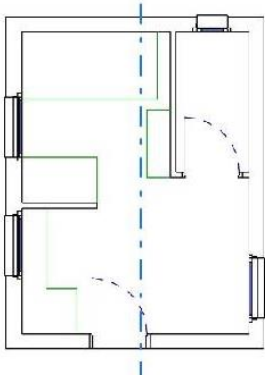
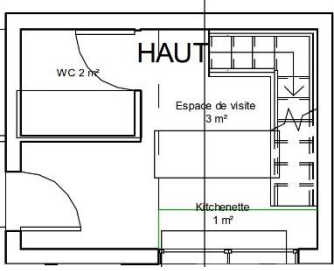
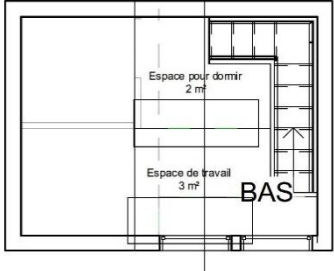
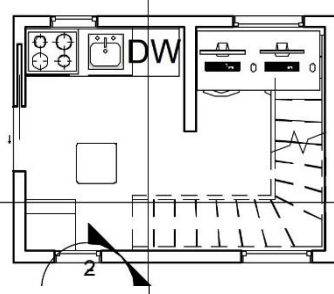
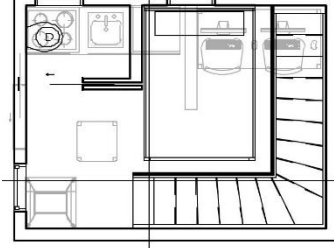
⁹⁵ Nous avons adopté dans la vérification des surfaces la marge d'acceptabilité de 12% qui est celle communément utilisée dans le domaine du bâtiment dans le calcul des surfaces pour des fins de vérification ou de calcul de métré.

Annexe 7 : Énoncé du test de niveau

<i>Exercice court</i>		
<i>Niveau : 3^{ème} année</i>	<i>Durée : 1 h :55</i>	<i>Date : 02/03/2018</i>
<p>Objectifs : Cet exercice permettra d'évaluer les compétences des étudiants en troisième année architecture en termes de maîtrise de l'outil Revit. Il a également pour objectif d'évaluer leur rapidité à utiliser l'outil durant la phase conception architecturale, quand le concepteur est confronté à plusieurs contraintes de programme qu'il doit résoudre au fur et à mesure de l'avancement de la conception.</p> <p>Durée : Une séance.</p> <p>Énoncé : Nous prévoyons dans cet exercice concevoir un espace de vie pour un étudiant en architecture. Un studio qui s'étale sur 12 m² de surface (3m x 4m) avec possibilité de mezzanine. Cet espace doit fournir à l'étudiant un cadre propice au travail, à la distraction et au repos. Il doit lui offrir ainsi :</p> <ul style="list-style-type: none">- un espace pour dormir,- un espace pour travailler,- un espace pour avoir de la visite, pour jouer à un instrument musical ou autre.- une salle d'eau,- une kitchenette, et- un dressing. <p>Rendu : A rendre en fin de séance au format Revit (.rvt). Une planche A3 comportant un plan, deux coupes et deux façades à l'échelle 1/100, avec deux vues extérieures en 3D et une axonométrie arrachée.</p> <p>Critères d'évaluation : Réponse architecturale (10 points).</p> <p style="text-align: center;">Maîtrise du logiciel (10 points)</p>		

Annexe 8 : Classement des participants selon les résultats du test de niveau

Rang	GROUPE 1	GROUPE 2
1er		
2ème		
3ème		

<p>4ème</p>		
<p>5ème</p>	 <p>WC 2 m²</p> <p>HAUT</p> <p>Espace de visite 3 m²</p> <p>Kitchenette 1 m²</p>  <p>Espace pour dormir 2 m²</p> <p>Espace de travail 3 m²</p> <p>BAS</p>	 <p>DW</p> <p>2</p>  <p>DW</p>

Annexe 9 : Enoncé du projet de l'expérimentation

PROGRAMME ARCHITECTURAL																																																		
Niveau : 3^{ème} année	Enseignante : Aida Siala	Du 09 mars au 13 avril 2018																																																
<p>Contexte et objectifs :</p> <p>Cet exercice se situe en continuité avec l'atelier informatique pour les étudiants en troisième année architecture. Il vise à mettre en épreuve l'acquisition des notions abordées tout au long de l'année universitaire au tour de l'outil Revit. Il a également pour objectif d'initier les étudiants à utiliser Revit en phase de conception architecturale, quand le concepteur est confronté à plusieurs contraintes de programme. La formation à l'outil étant focalisée durant le début de cette année universitaire sur certaines fonctionnalités ponctuelles de l'outil, appliquées sur des exercices de reproduction d'ouvrages bâtis. Au niveau de cet exercice, l'étudiant va se familiariser encore plus avec l'outil, il va le redécouvrir d'un autre point de vue, celui d'un concepteur.</p>																																																		
<p>Sujet et programme :</p> <p>Une famille compte construire une villa dans la commune de la Soukra sur un terrain rectangulaire de 20 x 25 mètres. Soit une surface totale de 500 m² (voir situation au verso). Le programme demandé par les futurs usagers de la villa est le suivant (voir tableau). Ils recommandent néanmoins des exigences en termes de fonctionnalité, de relation entre espaces et de confort à l'intérieur des espaces demandés.</p>																																																		
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">0.1 ID</th> <th style="width: 60%;">0.1 Nom</th> <th style="width: 30%;">0.1 Surface prévue</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>N Hall d'entrée</td><td>10,00</td></tr> <tr><td>2</td><td>N Salon</td><td>30,00</td></tr> <tr><td>3</td><td>N SAM</td><td>18,00</td></tr> <tr><td>4</td><td>N Séjour</td><td>32,00</td></tr> <tr><td>5</td><td>N Cuisine</td><td>25,00</td></tr> <tr><td>6</td><td>N SDE invités</td><td>6,00</td></tr> <tr><td>7</td><td>N Garage</td><td>24,00</td></tr> <tr><td>8</td><td>N Buanderie</td><td>6,00</td></tr> <tr><td>10</td><td>N Chambre parents</td><td>35,00</td></tr> <tr><td>11</td><td>N Chambre enfant 1</td><td>16,00</td></tr> <tr><td>12</td><td>N Chambre enfant 2</td><td>16,00</td></tr> <tr><td>14</td><td>N SDB enfant 1</td><td>5,00</td></tr> <tr><td>15</td><td>N SDB enfant 2</td><td>5,00</td></tr> <tr><td>16</td><td>N SDB parents</td><td>7,00</td></tr> <tr><td>17</td><td>N Dress parents</td><td>5,00</td></tr> </tbody> </table>			0.1 ID	0.1 Nom	0.1 Surface prévue	1	N Hall d'entrée	10,00	2	N Salon	30,00	3	N SAM	18,00	4	N Séjour	32,00	5	N Cuisine	25,00	6	N SDE invités	6,00	7	N Garage	24,00	8	N Buanderie	6,00	10	N Chambre parents	35,00	11	N Chambre enfant 1	16,00	12	N Chambre enfant 2	16,00	14	N SDB enfant 1	5,00	15	N SDB enfant 2	5,00	16	N SDB parents	7,00	17	N Dress parents	5,00
0.1 ID	0.1 Nom	0.1 Surface prévue																																																
1	N Hall d'entrée	10,00																																																
2	N Salon	30,00																																																
3	N SAM	18,00																																																
4	N Séjour	32,00																																																
5	N Cuisine	25,00																																																
6	N SDE invités	6,00																																																
7	N Garage	24,00																																																
8	N Buanderie	6,00																																																
10	N Chambre parents	35,00																																																
11	N Chambre enfant 1	16,00																																																
12	N Chambre enfant 2	16,00																																																
14	N SDB enfant 1	5,00																																																
15	N SDB enfant 2	5,00																																																
16	N SDB parents	7,00																																																
17	N Dress parents	5,00																																																
<p>Exigences spatiales :</p> <p>Pour le confort lumineux à l'intérieur des espaces, il est recommandé d'assurer l'éclairage naturel du hall d'entrée, de la cuisine et du dressing de la chambre des parents. L'ensoleillement des espaces de jour (salon, SAM, cuisine, séjour) et de la chambre des parents est souhaitable. Pour assurer un certain confort hygrométrique à l'intérieur des espaces humides (buanderie et points d'eau), une ventilation naturelle est à préconiser.</p> <p>Les propriétaires demandent des espaces de jour ouverts sur l'extérieur et communicants, avec une salle à manger à la fois accessible du salon et de la cuisine (Accès direct), pour une meilleure fonctionnalité quand ils auront de la visite. À cet effet, la salle d'eau des invités sera ainsi proche de la SAM. Pour l'utilisation journalière de la famille, il est préférable d'avoir le séjour à proximité de la cuisine. La cuisine doit être à son tour en relation avec le garage. Pour préserver l'intimité des chambres à couchers, celles-ci seront distribuées verticalement à partir du hall d'entrée principale. Les chambres enfants étant de préférence contiguës.</p>																																																		
<p>Contraintes réglementaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> - La surface couverte totale à ne pas dépasser est de 300m² (dont 170 m² au maximum au RDC). - L'alignement par rapport à la voie publique et le retrait par rapport aux limites séparatives à une distance minimale de 4 m. - Construction en R+1 avec un maximum de 8m de hauteur à l'acrotère. 																																																		

Éléments du rendu :

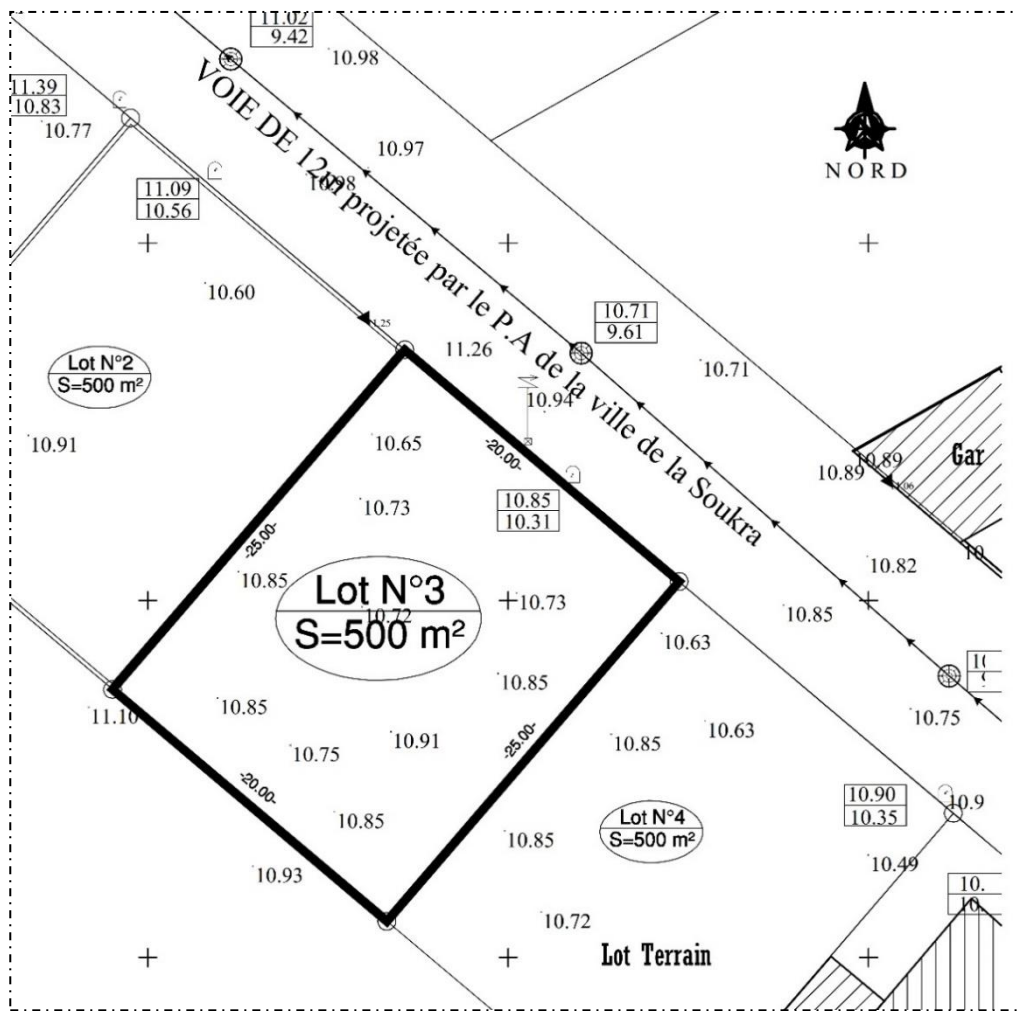
- Plan à l'échelle 1/100.
- 2 façades à l'échelle 1/100.
- Une vue en 3D.

Conditions de travail et mode d'évaluation :

L'exercice se déroulera sur 4 séances (les vendredis 09mars- 16mars – 6 avril et 13 avril). Le travail sera effectué en cours et jamais en dehors des séances prévues à cet effet. Il sera enregistré par capture vidéo d'écran pour être évalué ultérieurement.

Critères d'évaluation :

- Qualité de la réponse architecturale fournie (15 points).
- Maitrise de Revit (5 point).



Annexe 10 : Fiche de suivi de l'expérimentation

FICHE DE SUIVI

DATE

N° de séance

Groupe

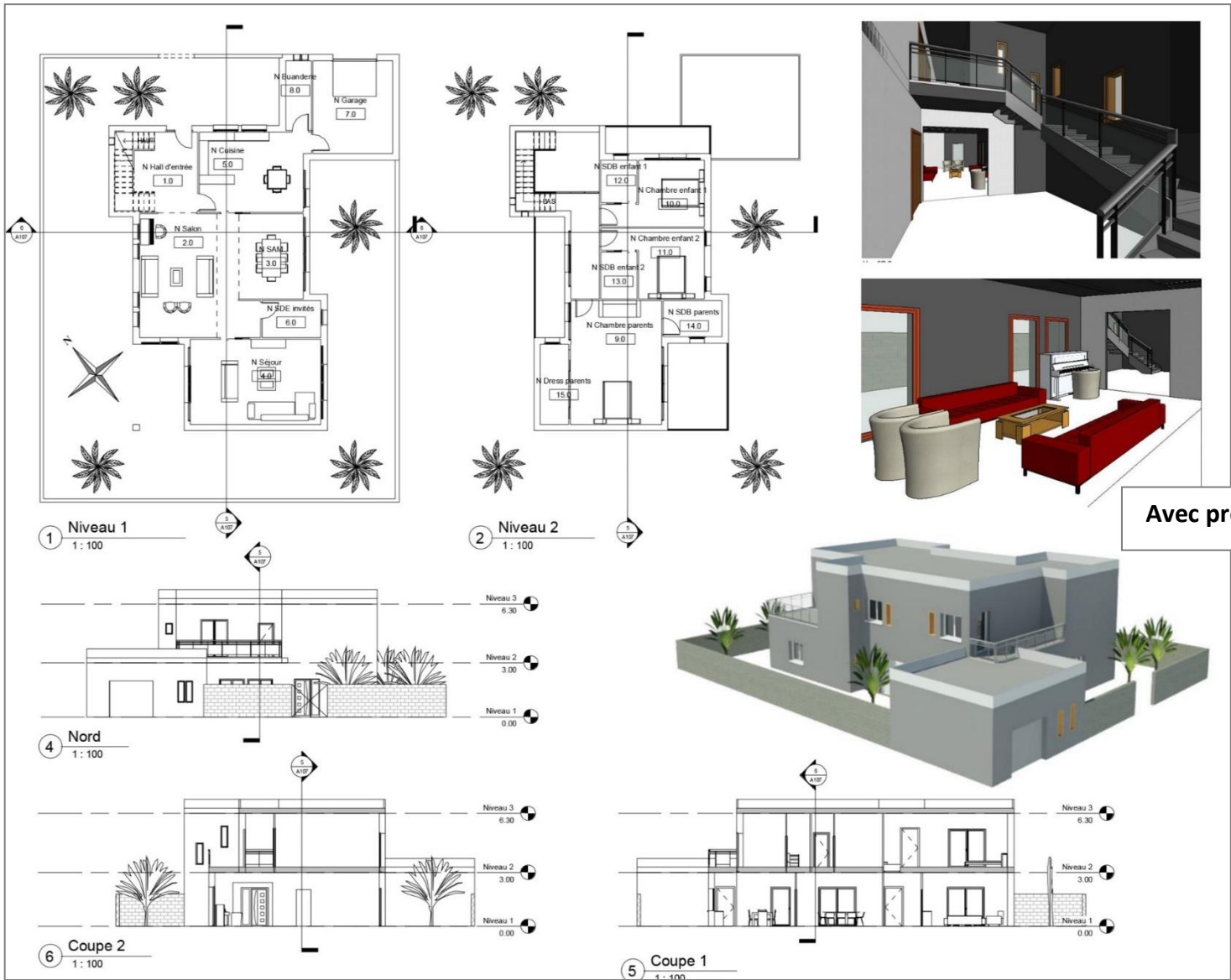
Observations générales

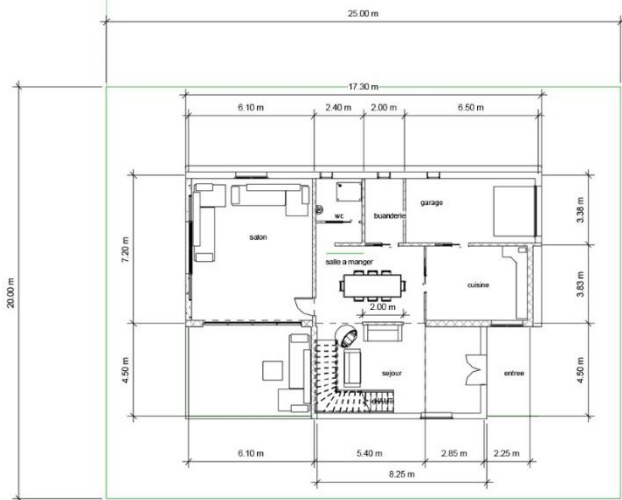
.....
.....
.....
.....
.....

Observations par étudiant

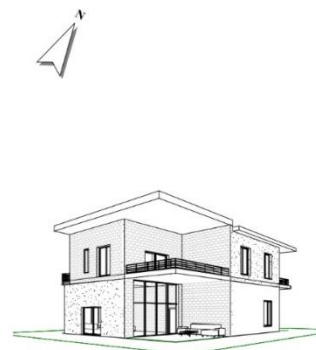
Etudiant 1	
Etudiant 2	
Etudiant 3	
Etudiant 4	
Etudiant 5	

**Annexe 11 : Exemple de rendu de chaque groupe expérimental
(avec et sans prototype)**

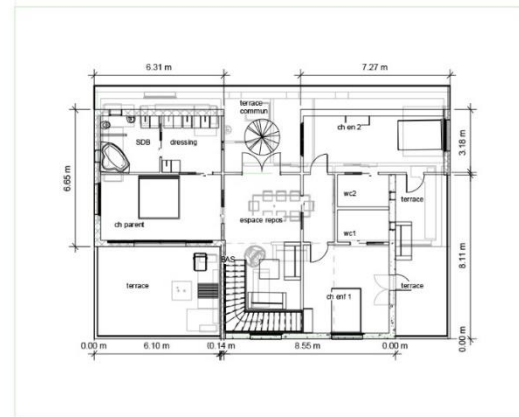




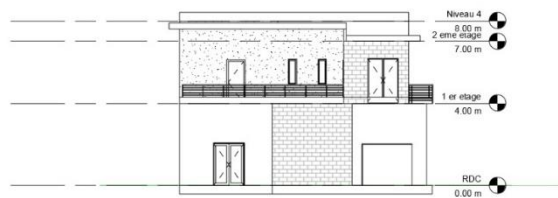
① RDC Copie 1
1: 100



⑥ Vue 3D 2



② 1er etage Copie 1
1: 100



④ Est Copie 1
1: 100



③ Sud Copie 1
1: 100



⑤ 3D 1

Sans prototype

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Gestion du cycle de vie d'un bâtiment à travers la démarche BIM.....	19
Figure 2 Exemple d'un objet de bâtiment avec la liste de ses propriétés dans l'environnement de Revit ...	23
Figure 3 Organigramme fonctionnel de l'extension du groupe scolaire de Vany.....	25
Figure 4 Diagramme UML de base du format UFPO (Barekati E. C., 2014)	36
Figure 5 Synapsie engendrée par la recherche du mot accès dans l'étude de programmation du Pôle des métiers de Metz.....	49
Figure 6 Le diagramme circulaire comme forme de représentation de la répartition des données de chaque type d'exigences par ordre d'importance.....	53
Figure 7 Diagramme de répartition des exigences d'accessibilité	54
Figure 8 Diagramme de répartition des exigences de topologie.....	55
Figure 9 Diagramme de classification des exigences de confort.....	56
Figure 10 Natures des descriptions illustrées dans les exigences d'accessibilité, de topologie et de confort et récapitulation des pourcentages mesurant les natures des descriptions dans les ESQ.....	57
Figure 11 Superposition des diagrammes de répartition des exigences d'accessibilité	59
Figure 12 Superposition des diagrammes de répartition des exigences de topologie	60
Figure 13 Superposition des diagrammes de répartition des exigences de confort.	60
Figure 14 Interface du plug-in dRofus pour Revit, liste des gabarits des pièces et visualisation sur Revit (https://wiki.drofus.com).....	66
Figure 15 Capture d'écran de l'évaluateur d'accessibilité de Xinaps.	67
Figure 16 Capture d'écran de la fenêtre volante de l'évaluateur de sécurité incendie de Xinaps, résultats du calcul du parcours de secours.....	67
Figure 17 Capture d'écran BIM 360 Design Collaboration, état des mises à jour, consultation et consommation des packages (https://info.bim360.autodesk.com/bim-360-design)	68
Figure 18 Les différentes étapes de collaboration de BIM 360 pour Revit (https://info.bim360.autodesk.com/bim-360-design).....	69
Figure 19 Détection des conflits entre les versions (https://bimtrack.co/features).	70
Figure 20 Capture d'écran Tekla BIMsight, visualisation du modèle BIM d'un immeuble en R+4 selon deux plans de coupe verticaux pour isoler la cage d'escalier et vérifier l'échappée.	72
Figure 21 Capture d'écran Tekla BIMsight, détection automatique des conflits entre le modèle de structure et le modèle MEP du même projet.....	72
Figure 22 Capture d'écran SMC, vérification automatique BIM architecture (fenêtre qui n'est pas reliée à son mur hôte) et création d'une notification pour l'architecte.	74
Figure 23 Capture d'écran SMC, vérification automatique BIM architecture (attachement des éléments et vérification de la distance).....	75
Figure 24 Modèle de base et exigences demandées.....	75
Figure 25 Grille d'analyse des outils BIM sélectionnés	77
Figure 26 Diagrammes d'analyse des outils BIM sélectionnés.....	79
Figure 27 Les abstractions conceptuelles décrivant les espaces (Bjork, 1992).	85
Figure 28 Modélisation conceptuelle des limites spatiales (Bjork, 1992).....	86
Figure 29 Modélisation conceptuelle des entités enveloppantes (Bjork, 1992)	87
Figure 30 Schéma des ouvertures et leurs relations avec les autres entités (Bjork, 1992).	88
Figure 31 Principe de base de Bjork pour attacher l'information géométrique à la description de l'élément (Bjork, 1992).....	88
Figure 32 Modèle des espaces, des limites spatiales et des structures enveloppantes (Bjork, 1992)	90
Figure 33 Ajout suggéré sur le modèle de Bjork pour assurer la cohérence avec la vue matérielle de l'espace.	92
Figure 34 Schéma de la représentation de la forme d'un objet (Ekholm, 2000)	93
Figure 35 Structure principale du schéma de l'espace d'entité de construction (Ekholm, 2000).....	94

Figure 36 Schéma de classification des exigences spatiales (Kim, 2015).	96
Figure 37 Représentation de la relation entre les espaces, les usagers et les exigences spatiales (Kim, 2015).	98
Figure 38 Spécification formelle de l'entité IfcSpace en langage EXPRESS	99
Figure 39 Schéma simplifié de l'entité IfcSpace avec son graphe linéaire d'héritage depuis IfcRoot, ses propriétés et ses relations (version IFC4 Add2).	101
Figure 40 Schéma simplifié de la spécification des limites spatiales (version IFC4 Add2).	102
Figure 41 Schéma simplifié de la spécification des éléments de bâtiment (version IFC4 Add2).	103
Figure 42 Schéma simplifié de la spécification des éléments de structure spatiale (version IFC4 Add2).	104
Figure 43 Schéma simplifié de la spécification des éléments d'ouverture (version IFC4 Add2).	106
Figure 44 Schéma de synthèse simplifié de la spécification du modèle IFC autour du concept d'espace architectural (version IFC4 Add2).	108
Figure 45 Les exigences spatiales qualitatives (ESQ ₁) prises ou pas prises en compte par le modèle IFC (IFC 4 Add2).	111
Figure 46 Types de propriétés de l'espace	117
Figure 47 Relations entre les espaces, les types d'espaces et les types d'activités.	118
Figure 48 Relations entre les espaces et les exigences spatiales	119
Figure 49 Extrait de notre modèle des exigences	121
Figure 50 Extrait du schéma de modélisation des objets, des ouvrages et des limites spatiales	125
Figure 51 Extrait du schéma de modélisation des percements et de leurs relations avec les espaces.	126
Figure 52 Notre schéma global des espaces et des exigences spatiales	127
Figure 53 Diagramme d'états transitions (UML) du concept d'espace architectural durant les phases de programmation et de conception.	129
Figure 54 Exemple de code de programmation visuelle sur Grasshopper qui permet de paramétrer les formes d'une ellipse et d'un triangle.	136
Figure 55 Déroulement de la démarche proposée, prototype et rôle de chaque acteur.	138
Figure 56 Exigences sur lesquelles se base le prototype avec les numéros des feuilles Excel correspondantes	140
Figure 57 Tableau des exigences, extrait de la feuille des exigences du programme	141
Figure 58 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences de disposition <Arrangement>	144
Figure 59 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences de relation <Relation>	144
Figure 60 Capture d'écran Excel du tableau des exigences, extrait de la fenêtre des exigences de distribution <Distribution>	144
Figure 61 Capture d'écran Dynamo, script d'ajout des pièces du programme à Revit	150
Figure 62 Captures d'écran Revit, liste des nouvelles pièces avant et après l'exécution du script d'ajout des pièces.	150
Figure 63 Capture d'écran Excel, extrait de la feuille des paramètres partagés	152
Figure 64 Extrait du fichier de paramètres partagés créé	152
Figure 65 Capture d'écran Dynamo, script d'ajout des nouveaux paramètres d'exigence à Revit	153
Figure 66 Capture d'écran Revit, extrait de la liste des propriétés des pièces avant et après exécution du script d'ajout des nouveaux paramètres à Revit.	153
Figure 67 Capture d'écran Dynamo, extrait du script d'ajout des valeurs de paramètres	155
Figure 68 Capture d'écran Revit, extrait de la liste des propriétés des pièces avant et après exécution du script d'ajout des valeurs de paramètres.	155
Figure 69 Exemple de début de conception	156
Figure 70 Capture d'écran Dynamo, Script de réinitialisation de vue	158
Figure 71 Captures d'écran Revit, fenêtre volante du lecteur Dynamo Player.	158
Figure 72 Exemple simplifié de pièce qui satisfait la règle.	159
Figure 73 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de l'éclairage naturel	160
Figure 74 Capture d'écran Dynamo, Script de vérification de l'éclairage naturel des pièces	161
Figure 75 Trajectoires du soleil selon la période de la journée et celle de l'année	162
Figure 76 Trajectoires du soleil au solstice d'hiver en Tunisie (https://www.sunearthtools.com)	163

<i>Figure 77 Angles du levé/couché du soleil au solstice d'hiver en Tunisie, selon les vecteurs d'orientation de Revit.....</i>	<i>163</i>
<i>Figure 78 Captures d'écran Revit après exécution du script de vérification de l'ensoleillement.....</i>	<i>164</i>
<i>Figure 79 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la distribution verticale.....</i>	<i>165</i>
<i>Figure 80 Exemples simplifiés des différents cas d'accès direct entre deux pièces.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure 81 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de l'accessibilité des pièces.....</i>	<i>168</i>
<i>Figure 82 Les possibilités de relation entre deux pièces prises en compte au niveau de ce travail</i>	<i>168</i>
<i>Figure 83 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la relation entre les pièces.....</i>	<i>170</i>
<i>Figure 84 Exemples simplifiés de cas de deux pièces ayant un mur en commun.....</i>	<i>171</i>
<i>Figure 85 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la contiguïté des pièces.....</i>	<i>171</i>
<i>Figure 86 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification de la proximité des pièces.....</i>	<i>173</i>
<i>Figure 87 Captures d'écran Revit avant et après l'exécution du script de vérification des surfaces des pièces.....</i>	<i>175</i>
<i>Figure 88 Procédure de sélection des participants.....</i>	<i>181</i>
<i>Figure 89 Extrait de la grille d'encodage, classification des variables à observer et méthode d'illustration des observations</i>	<i>185</i>
<i>Figure 90 Méthodes d'analyse et d'interprétation des résultats.....</i>	<i>186</i>
<i>Figure 91 Grille d'encodage des données des expériences.....</i>	<i>190</i>
<i>Figure 92 Diagramme de la moyenne des ESQ_L respectées par groupe expérimental.</i>	<i>191</i>
<i>Figure 93 Diagramme des ESQ_L respectées par groupe expérimental et par séance.....</i>	<i>193</i>
<i>Figure 94 Exemples de l'avancement d'un étudiant qui a travaillé avec le prototype durant la première séance (concentration sur le respect des exigences de surface)</i>	<i>194</i>
<i>Figure 95 Diagramme des moyennes du nombre de consultations du programme par groupe expérimental et par séance.....</i>	<i>195</i>
<i>Figure 96 Diagramme des moyennes des durées de consultation du programme par groupe expérimental et par séance.....</i>	<i>196</i>
<i>Figure 97 Capture d'écran Dynamo, extrait du script de vérification de la proximité des pièces</i>	<i>203</i>
<i>Figure 98 Captures d'écran Revit, étapes de la démarche de conception suivie par un participant qui a travaillé avec le prototype.....</i>	<i>206</i>
<i>Figure 99 Conception avec des volumes in situ, Revit 2018 (knowledge.autodesk.com)</i>	<i>207</i>
<i>Figure 100 Courbes des pourcentages mesurant les pièces ajoutées par groupe et par séance.</i>	<i>209</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 Tâches mettant en évidence la pertinence du concept d'espace architectural dans les pratiques BIM.</i>	29
<i>Tableau 2 Les exigences spatiales incluses dans le format COBie (East E. W., 2007)</i>	33
<i>Tableau 3 Projets correspondant aux études de programmations sélectionnées</i>	45
<i>Tableau 4 Guides de programmation architecturale sélectionnés</i>	45
<i>Tableau 5 Grille de catégorisation du type des exigences d'accessibilité</i>	46
<i>Tableau 6 Grille de catégorisation du type des exigences de topologie</i>	46
<i>Tableau 7 Grille de catégorisation du type des exigences de confort</i>	47
<i>Tableau 8 Grille de catégorisation des exigences d'accessibilité avec détails des descripteurs</i>	49
<i>Tableau 9 Grille d'analyse des ESQ_L et calcul des fréquences d'apparition des qualificatifs</i>	52
<i>Tableau 10 Capacité des modèles analysés à prendre en compte les données sur les espaces.</i>	109
<i>Tableau 11 Définition des énumérations des exigences d'accessibilité</i>	122
<i>Tableau 12 Définition des énumérations des exigences de topologie</i>	123
<i>Tableau 13 Définition des énumérations des exigences de confort</i>	124
<i>Tableau 14 Définition des états d'espace par valeur de propriété/donnée (* : ou plusieurs)</i>	129
<i>Tableau 15 Documents fournis par groupe</i>	183

Imprimé le 04 septembre 2019

MODELISATION ET REPRESENTATION DES EXIGENCES SPATIALES QUALITATIVES

Vers des pratiques BIM orientées « espace »

Résumé : En concevant, l'architecte donne à l'espace non seulement une forme, mais aussi des aspects de topologie, d'accessibilité et de confort. Cette production est basée sur un ensemble d'exigences spatiales qualitatives (ESQL) décrites en phase de programmation architecturale. Les pratiques BIM actuelles reposent sur des formats standards qui transforment toute l'information sur le bâtiment en données essentiellement quantitatives, ne permettant pas de prendre en compte ces exigences. Dans ce travail de recherche, nous proposons une nouvelle approche de conception qui permet d'intégrer les ESQL à l'outil BIM (Revit) et de vérifier la conformité de la conception en fonction. Cette approche repose sur un nouveau modèle d'espace incluant et structurant les ESQL. Ce modèle est spécifié sur la base d'un travail d'identification des ESQL les plus fréquemment utilisées pour qualifier les espaces en phase de programmation architecturale. Notre approche est évaluée à travers une démarche de validation expérimentale.

Mots clés : Assistance à la conception architecturale, BIM, exigence spatiale, topologie, accessibilité, confort, conception paramétrique.

MODELING AND REPRESENTING QUALITATIVE SPATIAL REQUIREMENTS

Toward « space » oriented BIM practices.

Abstract : In designing, the architect gives space not only a form, but also other aspects of topology, accessibility and comfort. This production is based on a set of qualitative spatial requirements (ESQL) described in the architectural programming phase. Current BIM practices are based on formats transforming all building information into essentially quantitative data, which does not allow taking into account these ESQL. In this research, we propose a new design approach that takes into account and verifies the ESQL using one of the current BIM tools (Revit). This approach is based on a new space model including and structuring the ESQL. This model is based on an identification work for the most frequently used ESQL to qualify spaces in the programming phase. Our approach is evaluated through an experimental validation process.

Key words : Architectural design assistance, BIM, spatial requirement, topology, accessibility, comfort, parametric design.