

SOMMAIRE

Table des matières

Table des Acronymes.....	7
Table des Figures	7
Introduction.....	8
Partie 1: Décrire le bâtiment - BIM.....	10
Qu'est-ce que le BIM ?	10
BIM en tant que technologie	11
BIM en tant que processus.....	12
Clash Detection	13
Qu'est-ce qu'un clash/collision ?	13
Les dimensions du BIM	14
LOD	15
Les formats d'échanges.....	17
IFC (Industry Foundation Class)	17
CoBie (Construction Operation Building Information)	18
Partie 2: Décrire le territoire - SIG.....	19
Un SIG pour analyser le territoire	19
Les formats d'échanges.....	20
CityGML	20
CityGML LOD.....	22
Partie 3: Pourquoi et comment passer du BIM au CIM ?	24
Pourquoi passer au CIM ?	26
Quelles données à disposition de la collectivité ?	27
Conclusion	29
Bibliographie.....	30
Webographie	31

Table des Acronymes

ADE Application Domain Extension.
AEC Architecture, Engineering and Construction.
BIM Building Information Modeling.
BIMserver Building Information Modelserver.
CAO Conception Assistée par Ordinateur.
CIM City Information Modeling.
CityGML City Geography Markup Language.
GIS Geographic Information System (version anglaise de SIG).
GML Geography Markup Language.
GUI Graphical User Interface.
IFC Industry Foundation Classes.
ISO International Organization for Standardization.
LOD Level-Of-Development.
LoD Level-of-Detail.
OGC Open Geospatial Consortium.
SIG Système d'Information Géographique.
STEP STandard for the Exchange of Product model data.
UML Uni_ed Modeling Language.
XML Extensible Markup Language.

Table des Figures

Figure 1 : Croisement entre les SIG et le BIM (adapté de Jacob Beetz, 2012)	8
Figure 2 : Le Bim d'apres Kymmell, W. (2008).....	11
Figure 3 : Issus de "Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond" par Salman Azhar (2012) A Comparison between "Traditional" and "BIM" Process (Courtesy of: Holder Construction, Atlanta, Georgia, USA)	13
Figure 4 : Extrait du livre "BIM & BTP : Construire grâce à la maquette numérique" de Clément VALENTE	16
Figure 5 : Tableau récapitulatif des LOD dans le BIM.....	17
Figure 6 : Les cinq niveaux LOD définis par le format CityGML (source : IGG Uni Bonn).....	22
Figure 7 : Représentation d'un bâtiment selon les 5 niveaux de LOD (source : Biljecki, 2016)	23
Figure 8 : Tableau récapitulatif des LOD CityGML (issu d'une proposition de Albert et al., 2013).....	23
Figure 9 : Croisement entre les SIG et le BIM (adapté de Jacob Beetz, 2012)	24
Figure 10 : Diagramme des packages UML illustrant les différents module composant le format CityGML (source : Geospatial Consortium, Open. (2012). City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, version: 2.0.0.).....	25
Figure 11 : Article 42 du Décret n° 2016-360 du 25 mars 2016 relatif aux marchés publics, (modification en rouge) (source : legifrance)	28

Introduction

Dans le milieu du bâtiment, depuis de nombreuses années déjà, les avancées du numérique se mettent en place. En passant du plan papier au plan numérique dans un premier temps par exemple, puis en intégrant l'ensemble des différents plans numériques du bâtiment dans une seule et même maquette numérique 3D. C'est la situation où se trouve aujourd'hui la majorité des entreprises en France. La prochaine étape est celle du BIM (Building Information Modeling), c'est-à-dire l'intégration de l'ensemble des informations concernant le bâtiment sur un seul et même fichier afin de compléter et de préciser la maquette numérique. Cela se fait par une coopération forte entre les différentes parties prenantes du projet. Mais le BIM n'est qu'une étape intermédiaire avant l'objectif suivant, et celui qui va nous intéresser dans ce projet, le CIM (City Information Modeling). Il s'agit d'être toujours plus précis et de compléter le modèle numérique du projet, en modélisant les environs de celui-ci afin de pouvoir l'étudier non plus seulement en tant que simple bâtiment, mais en tant que bâtiment dans un contexte particulier. En effet, en rajoutant l'environnement autour du bâtiment cela permet d'affiner la modélisation et donc d'avoir des résultats et un rendu plus fin. Mais surtout cela permet de ne pas seulement réfléchir à l'échelle d'un projet mais bien d'un territoire entier.

Pour passer du BIM au CIM, il ne faut pas seulement considérer le BIM. En effet, le CIM pourrait se définir de manière mathématique de la façon suivante : $CIM = BIM + SIG$

Comme présenté précédemment le CIM est un modèle numérique comprenant une maquette 3D et une base de donnée rattachée, l'ensemble formant un jeu de données le plus complet et précis possible, à l'échelle d'un territoire, et présentant de multiples applications possibles. Ce résultat s'obtient de la fusion entre les données d'un SIG (Système d'Information Géographique) auquel on vient rajouter les informations de plusieurs projets BIM. En effet, un SIG est un système contenant les données spatiales et géographiques d'un territoire à la fois sous forme de base de données et sous forme de représentation graphique associée. A l'échelle d'un territoire, un SIG permet d'effectuer des analyses spatiales en prenant en considération l'ensemble des facteurs renseignés dans sa base de données. Le principal problème est généralement que ces données ne concernent pas les bâtiments du territoire, ou alors seulement de façon approximative. De l'autre côté, on a le BIM qui contient l'ensemble des informations les plus précises possibles concernant un bâtiment mais rien ou presque sur l'environnement autour. Si on cherche à représenter les deux modèles on obtient le graphique suivant :

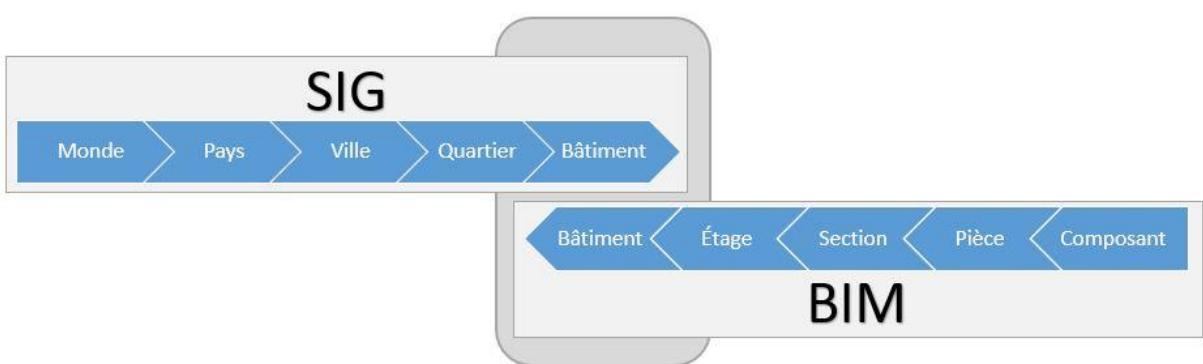


Figure 1 : Croisement entre les SIG et le BIM (adapté de Jacob Beetz, 2012)

Le bâtiment est donc le point commun entre ces deux domaines, entre ces deux modèles, et il doit donc servir de connecteur afin de les relier en vue de former un nouveau domaine, unique. Un domaine plus complet car la somme des informations comprises dans chacun de ces domaines respectifs, le CIM. Cela entraîne donc la problématique suivante :

Comment passer du BIM (Building Information Modeling) vers le CIM (City Information Modeling) ?

Tout d'abord, le BIM, à la fois comme technologie, processus ou outil de mise en place de projet, doit être présenter de manière plus précise. Cela, afin de mettre en avant ces possibilités, sera fait dans la partie 1 de ce rapport. Ensuite, le deuxième élément, composante principale du CIM, à savoir le SIG, sera introduit dans la deuxième partie du rapport, fermant ainsi, avec les présentations de deux formats d'échange, IFC et CityGML, l'état de l'art technique proposé par les deux premières parties du rapport.

En raison du chevauchement des fonctionnalités modélisées dans ces deux domaines ainsi que de leurs forces et faiblesses, on peut avancer que l'intégration des données des deux domaines sera bénéfique et constitue une avancée cruciale pour la modélisation future des villes en 3D. Cette intégration peut éviter des efforts inutiles dans la modélisation redondante et permettre de nouveaux flux de données dans les deux sens et de nombreuses opportunités. Les données BIM plus détaillées alimentent des données SIG plus générales, qui elles, fournissent le contexte qui manque généralement dans les données BIM. En poursuivant l'intégration des données SIG et BIM, les avantages pour les deux côtés peuvent être nombreux : avec les informations SIG contextuelles, les méthodologies BIM peuvent être mieux appliquées aux travaux d'infrastructure, et des modèles de villes 3D plus détaillés peuvent être construits en réutilisant ces données BIM.

Les intérêts pour la mise en place du CIM par la puissance publique sont donc nombreux mais ils posent également plusieurs questions. Le CIM permet de bénéficier d'une base de données précises sur l'ensemble de son territoire d'actions, et surtout sur un terrain suffisamment large pour pouvoir y effectuer des analyses spatiales de grande ampleur. C'est ces analyses qui sont importantes pour le fonctionnement de la ville. Cela sert également de base pour une mise en place du concept de ville intelligente. Mais comme on vient de le dire, cela repose sur des bases de donnée et la provenance, la qualité ou bien même l'accès à ces données est un enjeu majeur, qui devra être résolu pour envisager le développement du CIM. Cette technologie offre donc de nombreuses possibilités, mais pose au moins autant de questions que nous verrons plus en détails dans la troisième partie de ce rapport. Celle-ci, outre le fait de présenter, sans rentrer dans les détails techniques, comment passer au CIM, tentera de présenter quel est l'intérêt du CIM.

Partie 1: Décrire le bâtiment - BIM

Qu'est-ce que le BIM ?

Le BIM signifie Building Information Modeling, c'est à la fois une technologie et un process.

D'un point de vue technologique, un modèle BIM est une projection numérique d'un bâtiment contenant l'ensemble des informations disponibles concernant celui-ci. La maquette numérique, c'est-à-dire l'ensemble des plans 3D du projet est donc complété par une base de données comprenant les informations spécifiques. Ces plans sont détaillés à un niveau suffisant pour contenir tous les composants du bâtiment, avec des liens entre chaque composant et les informations associées, comme le planning, le design, les matériaux, etc...

Le concept de BIM est un concept ancien puisque dès 1962, l'informaticien Douglas C.Englebart parlait d'une représentation géométrique couplée à une base de données permettant d'optimiser la conception d'un projet (Engelbart, 1962). Cela restera uniquement à l'état de concept car les moyens informatiques de l'époque ne permettent pas de mettre en place son idée. En revanche, cela marque le début du cheminement. Treize ans plus tard, Chuck Eastmann met en place la Conception Assistée par Ordinateur incluant une base de données. Le début des années 1980 voit la création de la première version d'AutoCad et l'avènement des premiers dessins par ordinateur. Par la suite les premières utilisations de base de données centralisées dans des projets suivis d'application par des logiciels dits "métiers" pour faire des calculs acoustiques, thermiques, etc... dès le milieu des années 1980. Devant la multiplicité des logiciels permettant ces traitements, une réflexion se met en place sur l'interopérabilité entre logiciels. Ces réflexions donneront naissance aux premiers formats d'échanges ouverts dits formats libres.

Ces différentes avancées technologiques ont permis de rendre la création du BIM possible, sous sa forme présente. La première utilisation du mot BIM date de 2002 aux États-Unis, pour décrire un projet de sa conception à sa construction (Laiserin, 2003).

Aujourd'hui, le BIM peut être utilisé en français pour parler de plusieurs notions différentes, ce qui peut être source de confusions :

- BIM pour "Building Information Modeling"

Il s'agit de l'acronyme le plus couramment utilisé. Dans ce cas, il s'agit d'un processus d'échanges d'informations avec une maquette numérique, dans un objectif collaboratif entre différents acteurs sur un projet particulier.

- BIM pour "Building Information Model"

Il s'agit de la maquette numérique, c'est-à-dire de la représentation numérique 3D d'un ouvrage et de ses caractéristiques. C'est une base de données contenant des informations précises sur l'ouvrage du projet, sur ses composantes, sur les caractéristiques et relations entre ces objets afin de compléter la description purement géométrique de la forme du bâtiment.

- BIM pour "Building Information Management"

Il s'agit de l'organisation, des méthodes et processus de travail. C'est la conceptualisation du contrat ou de la convention BIM mise en place qui régit les relations et le mode de fonctionnement entre les différents acteurs impliqués dans le projet.

La définition globale du BIM, comme acronyme de Building Information Modeling comprend donc l'ensemble de ces trois définitions, c'est pour cela que le BIM est à la fois une technologie et un process. Le BIM est un processus visant à créer, maintenir, compléter et exploiter les données disponibles sur un bâtiment pour permettre sa construction. Le BIM consiste à "construire" avant la construction, de manière numérique, l'ouvrage afin d'optimiser sa planification, son coût, sa qualité grâce à une meilleure gestion, tout en réduisant grandement les risques très en amont, dès les premières phases du projet. En effet, les modifications sont très faciles sur un plan numérique, mais elles deviennent beaucoup plus complexes et onéreuses lorsqu'elles doivent

être faites sur chantier une fois le bâtiment réalisé. En couvrant l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un ouvrage cela permet donc une économie importante. Mais cela nécessite également une importante collaboration entre les différents acteurs de la construction ainsi qu'une gestion efficace des informations utiles et nécessaires au projet.

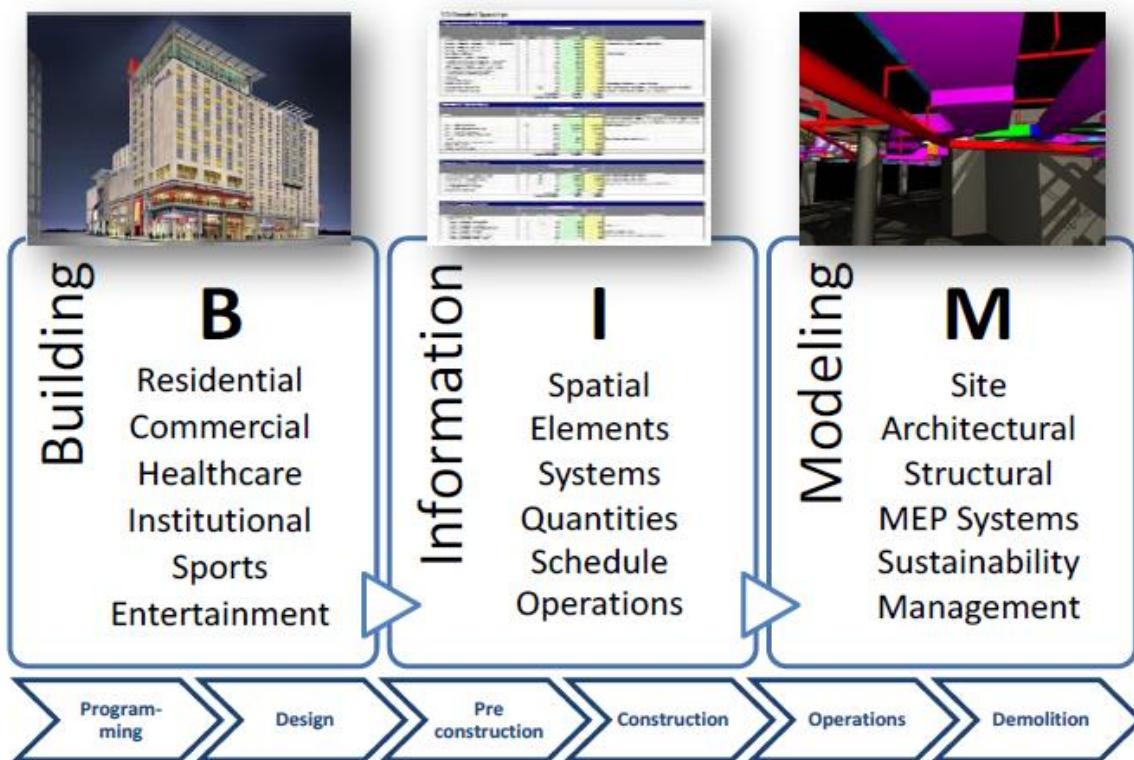


Figure 2 : Le Bim d'après Kymmell, W. (2008)

BIM en tant que technologie

Le BIM est, en partie basé sur le fonctionnement des logiciels de CAO/DAO, il est donc important de les connaître. La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) comprend l'ensemble des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de réaliser et de tester des produits, de manière 100% numérique. Le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) est une discipline permettant de produire des dessins techniques avec un logiciel informatique. Pour faire simple on peut dire que, en DAO, la souris et le clavier remplacent le crayon et les autres instruments du dessinateur papier.

On confond souvent CAO et DAO : bien qu'elle permette largement de le faire, la CAO n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu, l'édition éventuelle d'un plan ou d'un schéma étant automatique et accessoire. En DAO, un trait est un trait et le logiciel ne permet pas l'interprétation technique de l'ensemble.

La technologie BIM repose donc sur des logiciels de CAO/DAO et également sur la technique de modélisation dites "paramétrique orientée objet" (Azhar et al., 2008b). Le terme « paramétrique » décrit un processus par lequel quand un élément est modifié, un élément ou un assemblage adjacent (par exemple une porte fixée au mur) est automatiquement ajusté pour maintenir la relation établie précédemment (Stine, 2011).

Dans un modèle CAO 3D conventionnelle, le bâtiment est décrit par des vues 3D indépendantes les unes des autres, comme des coupes, des plans, et des élévations. La modification de l'une de ces vues nécessite la vérification et la mise à jour de toutes les autres vues, processus source d'erreurs et l'une des principales causes de mauvaise documentation. En outre, les données de ces dessins 3D sont uniquement des entités graphiques, telles que des lignes, des arcs et des cercles, c'est à dire que les entités n'ont pas "conscience" de ce qu'elles sont. Il s'agit là des principales différences avec la technologie BIM. En effet, dans la sémantique contextuelle intelligente des modèles BIM, les objets sont définis en termes d'éléments de construction et de systèmes tels que les espaces, les murs, les poutres. Ces objets interagissent donc entre eux en fonction de leurs attributs, c'est la "conscience" évoquée précédemment. Pour donner un exemple concret, dans une modélisation BIM, une porte va "savoir" qu'elle doit être encastrée dans un mur, ainsi si lors du dessin ou d'une modification le mur est modifié ou supprimé, la porte le sera également en fonction de ce qui a changé. Il s'agit là d'une fonctionnalité très importante du BIM appelée "clash detection" dont on parlera un peu plus loin. Un modèle BIM contient toutes les informations relatives au bâtiment, comme ses caractéristiques physiques et fonctionnelles, mais également les informations de cycle de vie du projet, le tout dans une série « d'objets intelligents ». Par exemple, une unité de climatisation dans un BIM contiendrait également des données sur son fournisseur, ses procédures d'exploitation et de maintenance, ses débits et ses exigences en matière de dégagement (Azhar et Richter, 2009). Si un modèle numérique se veut être un modèle BIM, aucun des points suivants ne doit être validé (Eastman et al., 2011) :

- Le modèle contient uniquement des données 3D et aucun attribut d'objet (c'est-à-dire qu'il manque le « i » du BIM).
- Le modèle ne présente pas de comportement "conscients" des objets.
- Le modèle est composé de plusieurs fichiers de référence CAO 2D devant être combinés pour définir le bâtiment.
- Le modèle autorise des modifications de dimensions dans une vue qui ne sont pas automatiquement reflétées dans les autres vues.

La liste étant non exhaustive. Le BIM étant un ensemble d'aspects, il ne suffit pas d'en valider un ou deux pour être considéré comme projet BIM.

BIM en tant que processus

Le BIM peut être considéré comme un processus virtuel englobant tous les aspects, disciplines et systèmes d'une installation au sein d'un même modèle virtuel, permettant à tous les membres de l'équipe (propriétaires, architectes, ingénieurs, entrepreneurs, sous-traitants et fournisseurs) de collaborer avec davantage de précision et d'efficacité que dans les processus traditionnels. Au fur et à mesure que le modèle est créé, les différents collaborateurs affinent et ajustent constamment leurs travaux en fonction des modifications et des spécifications du projet, pour que la conception du modèle soit aussi précise que possible avant réalisation réelle du projet (Carmona et Irwin, 2007). Les bases du BIM sont posées sur deux piliers, communication et collaboration. La mise en œuvre réussie du BIM nécessite une implication précoce de toutes les parties prenantes du projet. Cela signifie que les livrables classiques du projet traditionnel se retrouvent inclus dans un processus plus global (par exemple, conception-soumission-construction).

La figure 3 illustre la différence entre « traditionnel » et processus « BIM ».

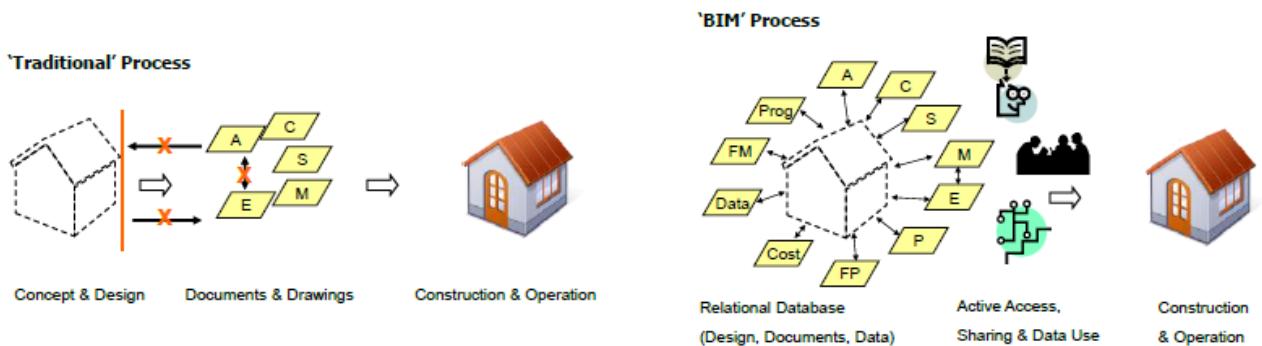


Figure 3 : Issus de "Building Information Modeling (BIM): Now and Beyond" par Salman Azhar (2012)
 A Comparison between "Traditional" and "BIM" Process
 (Courtesy of Holder Construction, Atlanta, Georgia, USA)

Clash Detection

L'un des principaux avantages du BIM est la possibilité de détecter les « conflits » à un stade précoce de votre projet, ce qui devrait être beaucoup plus facile, moins coûteux et moins fastidieux.

Qu'est-ce qu'un clash/collision ?

En terme de conception, une collision se produit lorsque des composants ne sont pas coordonnés spatialement et en conflit. Ces collisions ont lieu pour différentes raisons. Sur un projet de bâtiment, un large éventail de disciplines s'unissent pour travailler sur les différents aspects du projet. En utilisant le modèle de l'architecte comme point de départ, un ingénieur en structure, un ingénieur en environnement, un ingénieur en mécanique et en électricité (et potentiellement de nombreux autres) produiront chacun leurs propres plans et modèle. Chaque « modèle » consistera en une gamme de fichiers de modèles, de documents et de fichiers de données structurés contenant des informations non géométriques sur ce qui est en cours de construction. Tous ces modèles sont ensuite réunis sous la forme d'un grand fichier numérique contenant donc la globalité du projet.

C'est lors de cette mise en commun que l'on peut alors voir apparaître des "clash". L'erreur la plus importante est lorsque deux composants occupent le même espace. Celles-ci sont souvent appelées « collision dure » - une colonne traversant un mur ou une tuyauterie à travers une poutre en acier, par exemple. Ces types d'affrontements peuvent prendre beaucoup de temps et coûter très cher à réparer s'ils ne sont découverts avant la phase chantier. Une « collision douce » se produit lorsqu'un élément ne dispose pas des tolérances spatiales ou géométriques requises. Par exemple, une unité de climatisation peut nécessiter certains dégagements pour permettre la maintenance, l'accès ou la sécurité qu'une poutre en acier annulerait. Avec des données d'objet suffisantes, un logiciel peut même être utilisé pour vérifier le respect des réglementations et normes en vigueur, comme les largeurs PMR, etc... Enfin d'autres types de conflits, non spatiaux, peuvent également être mis en avant, et notamment au niveau de la planification des intervenants, de la livraison des équipements et du matériel ou des conflits de calendrier généraux. Celles-ci sont souvent appelées "conflits de flux de travail ou 4D".

La prévention des collisions est un élément clé du processus de conception et de construction. Le fait de résoudre ces problèmes le plus tôt possible dans la gestion du projet permet de faciliter le déroulement de celui-ci. Le niveau de détail de la modélisation BIM est donc crucial pour la détection des conflits. Le BIM permet donc d'automatiser une tâche de contrôle qui s'effectuait auparavant à la main et de façon beaucoup moins sûre qu'aujourd'hui. Selon une estimation du site spécialisé www.thebimcenter.com, les économies réalisées grâce à la détection des collisions aux Etats-Unis seraient d'environ 17 000 dollars par collision détectée en moyenne.

Les dimensions du BIM

Sur un projet BIM, de nombreuses dimensions entrent en jeu et cohabitent pour obtenir un résultat toujours plus complet.

- 2D : La visualisation 2D du projet est celle du plan. Que ce soit en version numérique ou en version papier le plan est un outil indispensable de l'exécution des travaux, il est également nécessaire pour pouvoir échanger avec les entreprises qui ne possèdent pas le matériel permettant d'utiliser d'autres technologies.
- 3D : La maquette numérique classique selon les trois dimensions géométriques X-Y-Z. C'est la représentation en 3 dimensions de l'ouvrage, comportant les caractéristiques géométriques (plans, coupes, ...) ainsi que les informations liées à sa nature (propriétés, composition, etc...) Elle permet les visualisations, la préfabrication, les détections d'interférence, le calcul des quantités, les relevés de l'existant, etc... C'est la base du BIM.
- 4D : La 4^e dimension est celle du "temps". L'ajout de cette dimension à la 3D permet la planification, l'ordonnancement et la visualisation en 3D des étapes de construction (approvisionnement, gestion du chantier et des plannings de réalisation par corps d'états, par lots et par tâches, simulation des éventuels incidents et de leur conséquence sur le planning et particulièrement la date de livraison finale. La 4D permet la réalisation de manière automatisée de nombreux documents de planning, comme les diagrammes de GANTT ou de PERT.
- 5D : La 5^e dimension est celle du "coût". L'ajout de l'aspect financier permet de connecter les éléments géométriques et la contrainte du "temps" à un "coût" et ainsi estimer les coûts de construction du projet. Cela permet également de gérer les finances du projet et du chantier et par exemple d'obtenir un aperçu de la situation financière d'un projet à un moment donné. Enfin, les calculs de quantitatifs peuvent être automatisés ce qui est un gain de temps important.

Alors que l'industrie est unanime pour les 5 premières dimensions, différents avis existent pour les dimensions suivantes. Les dimensions suivantes sont donc celles reprises le plus largement dans le secteur.

- 6D : La 6^e dimension est celle de l'environnement/du développement durable. Cet ajout concerne généralement tout ce qui touche au développement durable. Il s'agit d'analyses énergétiques et/ou d'analyses d'impact environnemental. Elles servent par exemple aux calculs de la RT2012 ou du Label E+C-, encore une fois dans le but d'automatiser les calculs.
- 7D : Cette couche relie les données du projet à tous les aspects du cycle de vie du bâtiment. La maquette remise au DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés) contient toutes les informations du projet "tel que construit" pour permettre la gestion du patrimoine du bâtiment, ainsi que son exploitation et sa maintenance.

D'autres dimensions peuvent aisément être ajoutées, à partir du moment où l'ensemble des intervenants du projet renseignent les informations nécessaires et valident l'utilité de l'ajout d'une nouvelle dimension. On peut alors imaginer une dimension liée à la gestion des déchets, à l'usage du bâtiment, etc...

LOD

Lors d'un projet, la construction de la maquette BIM ne se fait pas en une seule fois, au contraire celle-ci avance au fur et à mesure afin de toujours devancer l'avancement de celui-ci. Afin de suivre cet avancement mais également afin de fixer des paliers distinctifs, l'American Institute of Architects (AIA) a défini le "Level Of Development" (niveau de développement) abrégé LOD.

BuildingSMART, anciennement Alliance internationale pour l'interopérabilité (IAI), est une organisation internationale qui vise à améliorer l'échange d'informations entre les applications logicielles utilisées dans l'industrie de la construction. Elle a mis au point des IFC (Industry Foundation Classes) dont nous parlerons plus tard, en tant que spécification neutre et ouverte pour les modèles d'information du bâtiment (BIM).

IAI a débuté en 1994 en tant que consortium industriel composé de 12 sociétés américaines invitées par Autodesk, l'entreprise à l'origine d'Autocad, à donner des conseils sur le développement d'un ensemble de classes C ++ afin de prendre en charge le développement d'applications intégrées. Les autres membres fondateurs étaient : AT&T, ARCHIBUS, Carrier Corporation, Hellmuth, Obata et Kassabaum (HOK), Honeywell, Jaros, Baum & Bolles (JB & B), Lawrence Berkeley Laboratory, Systèmes Primavera, Softdesk, Timberline Software Corp, et Tishman Research Corp. Comme expliqué au début de cette partie, c'est une réflexion qui se met en place sur l'interopérabilité entre logiciels.

Cette alliance industrielle pour l'interopérabilité a été ouverte à toutes les parties intéressées en septembre 1995. En 1997, les différents membres, sous la pression de leurs utilisateurs respectifs, ont obtenu que le standard mis en place soit non propriétaires et développée sous la norme IFC. L'alliance industrielle a évolué pour devenir une organisation à but non lucratif dirigée par l'industrie, afin de promouvoir la "Industry Foundation Class" (IFC). BuildingSMART est aujourd'hui présent partout à travers le monde via des antennes régionales en Europe, en Amérique du Nord, en Australie, en Asie et au Moyen-Orient.

BIMForum est la version américaine de BuildingSMART International et s'occupe aujourd'hui de promouvoir et de soutenir l'utilisation des normes ouvertes pour le BIM dans l'ensemble du secteur, dans le cadre d'un effort à long terme visant à parvenir à des échanges d'informations entièrement numérisés. C'est dans le cadre de cette mission que BIMForum publie tous les ans une version mise à jour d'un ouvrage intitulé "LEVEL OF DEVELOPMENT(LOD) – SPECIFICATION". Ce guide est développé sur la base du schéma du LOD développé par l'American Institute of Architects (AIA), est conçu comme une norme de référence, mais évolue au fur et à mesure de l'utilisation du BIM et des différents retours d'expérience.

Cinq niveaux distincts de développement existent ainsi, basés sur des critères définis précisément. Ces niveaux de développement (LOD) servent d'échelle afin de qualifier le niveau de précision attendue de la maquette numérique, au cours de l'avancement du projet. Ils sont organisés du niveau le plus bas LOD 100 vers le plus complet LOD 500. L'illustration suivante permet de facilement visualiser le niveau de simplicité, ou de détails attendu selon le LOD.

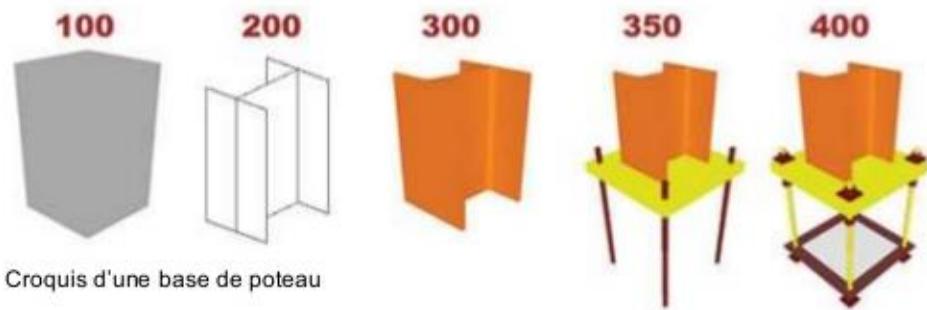


Figure 4 : Extrait du livre "BIM & BTP : Construire grâce à la maquette numérique" de Clément VALENTE

LOD 100 : l'ouvrage est représenté par un volume sommaire, c'est un niveau d'esquisse. Il permet de réaliser des simulations d'encombrement et d'aménagement locaux. Les éléments du modèle peuvent être représentés par un symbole ou de manière très simplifiée, générique. Les informations contenues dans les éléments peuvent provenir d'autres éléments.

LOD 200 : l'ouvrage, par exemple ici le poteau, devient un ouvrage ayant des caractéristiques mécaniques basiques mais suffisantes pour réaliser des premières estimations de calculs d'efforts et de dimensionnement. Les différents éléments sont représentés graphiquement d'une manière simplifiée, en tant qu'objet ou assemblage. Les dimensions, positions, formes, quantités et orientations des éléments peuvent être approximatives.

LOD 300 : le poteau est clairement identifié et possède des dimensions précises. Il est associé à un modèle précis de profils métalliques existants avec toutes les informations liées. Les différents éléments sont représentés graphiquement d'une manière spécifique et précise, en tant qu'objet ou assemblage. Les dimensions, positions, formes, quantités et orientations des éléments sont spécifiques aux éléments.

LOD 350 : les détails d'assemblages entre les différents éléments sont à l'étude et permettent de consulter des entreprises et d'établir des devis. En revanche, ils ne sont pas assez précis pour être utilisés en exécution. Comme pour le LOD 300, les différents éléments sont représentés graphiquement d'une manière spécifique et précise, en tant qu'objet ou assemblage. Les dimensions, positions, formes, quantités et orientations des éléments sont spécifiques aux éléments. Mais en plus, les éléments interagissent avec les autres éléments.

LOD 400 : le niveau de précision de l'ensemble des éléments est suffisamment détaillé et documenté pour servir à lui seul de base au chantier, avec un niveau de détail du plan d'exécution afin de réaliser les travaux. Il contient les mêmes informations que le LOD 350 mais avec en plus les informations sur le détail, la fabrication, l'assemblage et l'installation des éléments.

LOD 500 : Ce niveau de développement correspond à la maquette numérique DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés) livrée au client et qui sert de base pour l'exploitation du bâtiment. Les informations sont identiques au LOD 400 mais tel que construit et vérifié sur place.

On peut résumer ces niveaux dans le tableau suivant, avec la phase d'avancement du projet à laquelle ils correspondent : (ESQ : Esquisse ; APD : Avant-Projet Définitif ; Pro : Projet ; EXE : Exécution)

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 350	LOD 400	LOD 500
Symboles avec volumes et surfaces	Modèles génériques	Représentation spécifique	Représentation spécifique + assemblages	Représentation détaillée	Représentation réaliste
Pas d'informations associées	Possibles informations quantitatives, volumes associés	Informations pour traitement des composants : tailles précises, positionnement, entreprise, ...	Informations pour traitement des composants (idem LOD 300) + 1 ^{ère} approche sur les assemblages	Traitements exacts des composants et assemblages (quantitatifs et dimensionnels, 1 ^{ère} approche sur la fabrication et mise en œuvre)	Informations détaillées et conformes
ESQ	APD	PRO	PRO	EXE	As built

Figure 5 : Tableau récapitulatif des LOD dans le BIM

Les formats d'échanges

Il existe de nombreux formats d'échange afin de permettre une interopérabilité entre les différents logiciels existants. C'est un point particulièrement important dans l'univers BIM. En effet, dans la logique de processus BIM la coopération entre les parties prenantes du projet est primordiale à la bonne réalisation de celui-ci. Il est donc nécessaire, pour que cette coopération soit possible, que les différents interlocuteurs puissent s'échanger les fichiers sur lesquels ils travaillent. Or, on ne peut pas demander à ce que toutes les entreprises possèdent exactement le même logiciel et il n'est pas concevable pour les entreprises de céder, sans contrepartie financière, leurs formats de fichiers propriétaires. C'est donc pour ces raisons qu'il est primordial de disposer de formats d'échanges libres, afin de permettre le bon fonctionnement du BIM. Parmi ces formats d'échanges, il en existe plusieurs avec des spécificités propres à chacun.

IFC (Industry Foundation Class)

Il s'agit du format principal d'échange pour le BIM. Le format IFC est né de la norme référence dans l'industrie ISO 10303 dite STEP pour "STandard for Exchange of Product data". Cette norme sert à décrire un produit tout au long de son cycle de vie, et indépendamment du système informatique. La version 1 fut publiée en 1997. Aujourd'hui, le format IFC est un format de fichier standardisé (norme ISO 16739) et en est rendu à la version IFC4.

Le format IFC constitue un modèle "sémantique" basé sur la notion d'objet. Il permet de décrire des objets (murs, fenêtres, espaces, poteaux...) et leur géométrie, ainsi que leurs relations entre eux (comme le percement d'un mur par une ouverture et l'association d'une porte à cette ouverture). A chaque "objet" peut être associé un certain nombre d'informations, elles aussi codifiées afin d'être lues de manière uniforme par l'ensemble des logiciels du marché. Ces "classes d'objets" traitent :

- de la forme des objets ainsi que de leurs caractéristiques (comme la composition d'un mur),
- du bâtiment tout au long du cycle de programmation, (conception, construction, gestion) et selon différents points de vue (architecture, structure, thermique, estimatif...).

La norme IFC comporte plus de 800 classes d'objets ce qui permet une grande précision dans la qualification de la donnée. Chaque nouvelle version améliorant la précision et la complémentarité de ces classes. Le format IFC définit donc la façon dont l'information va être structurée pour pouvoir être lue et correctement interprétée par les "machines" logiciels. Ce format d'échanges de données structurées garantit le partage d'informations entre les différents logiciels-métiers dans un projet BIM. Actuellement, le format IFC est le seul "OpenBIM" suffisamment développé et s'est donc imposé comme standard mondial.

CoBie (Construction Operation Building Information)

Ce format d'échange a été créé par l'US Army Corps of Engineers en 2007. Il est, depuis 2016, obligatoires pour les livrables BIM au Royaume-Uni. Il s'agit d'un cadre utilisé dans les contrats de construction par la maîtrise d'ouvrage et les gestionnaires de patrimoine dans les pays anglo-saxons. Il est particulièrement optimisé pour les gestionnaires de patrimoine immobiliers, pour l'exploitation et la maintenance de leurs ouvrages. Bien qu'il s'agisse d'un format d'échange à part entière, il est en partie basé sur des définitions du format IFC. De plus, hors du Royaume-Uni il reste peu utilisé en comparaison avec le standard IFC.

Partie 2: Décrire le territoire - SIG

Comme il a déjà été présenté dans l'introduction de ce rapport, l'objectif de ce travail est d'étudier le fonctionnement du BIM à une échelle plus large, afin de bénéficier de l'apport de ces données sur un territoire plus grand que celui du simple projet de bâtiment. Pour cela, il est donc important de voir comment ce changement d'échelle peut se réaliser.

Dans la partie précédente le BIM a été longuement introduit, nous allons maintenant voir quels sont les outils permettant d'étudier un territoire dans sa globalité, en se basant ici sur une approche cartographique et un fonctionnement similaire au BIM.

Un SIG pour analyser le territoire

Un système d'information géographique (SIG) est un système d'information conçu pour de nombreuses actions différentes, à commencer par la principale, l'analyse spatiale. Mais plus généralement, un SIG permet de recueillir, traiter, analyser, stocker, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques. Le concept simple du SIG concerne les données de l'infrastructure spatiale de manière globale. D'une certaine façon, en lui-même le SIG ne sert qu'à "préparer" les données. Les applications liées aux SIG sont les outils qui permettent aux utilisateurs de créer des requêtes, et ainsi d'analyser l'information spatiale, de modifier ou d'éditer les données. Ces analyses sont matérialisées par le biais de cartes.

La première utilisation du terme « Système d'Information Géographique » date de 1968 dans un essai de Roger Tomlinson : « Un système d'information géographique pour l'aménagement du territoire ». Roger Tomlinson est depuis considéré comme le père du Système d'Information Géographique. Mais bien qu'il s'agisse, là, de la première utilisation du terme, le concept de fonctionnement est plus ancien. En effet, auparavant, l'une des premières applications connues de l'analyse spatiale date de 1832, dans le domaine de l'épidémiologie, avec la publication du « Rapport sur la marche et les effets du choléra dans Paris et le département de la Seine », du géographe français Charles Picquet. Dans ce rapport, le géographe a représenté les 48 districts de la ville de Paris. Il a ensuite, utilisé un système de coloris dégradé en fonction du pourcentage de décès par le choléra pour 1000 habitants. Il s'agit là d'un document graphique permettant de représenter les résultats de l'analyse spatiale. Car autre le besoin de pouvoir analyser spatialement le problème, il est souvent encore plus important de pouvoir représenter et diffuser les résultats de ces analyses.

De manière générale, les SIG ont connu un développement similaire à celui des logiciels de CAO/DAO une fois l'arrivée de l'ordinateur. Avec l'augmentation progressive de la puissance de calcul des machines, les premiers logiciels SIG ont pu voir le jour, d'abord de manière institutionnelle et dans le domaine de la recherche dans les années 60 avec le Système d'Information Géographique du Canada (SIGC), par exemple. Puis dans les années 80, le premier logiciel de SIG pour ordinateur personnel a été développé. Aujourd'hui, la puissance des différents systèmes d'informations a permis aux SIG de se démocratiser et de devenir accessible à tous les utilisateurs disposant d'un ordinateur et d'un accès à Internet. Les solutions développées sont nombreuses et bien que le principe de fonctionnement général soit le même pour tous, il existe un grand nombre de formats de fichier différents, causant des problèmes d'interopérabilités. Afin de résoudre ces problèmes, des formats libres d'échanges de données ont vu le jour, comme le CityGML que nous allons voir plus tard.

Le SIG est un terme général se référant à un certain nombre de technologies, de processus et de méthodes de fonctionnement. Celles-ci sont, dans l'ensemble, étroitement liées à l'aménagement du territoire, à la gestion des infrastructures et des réseaux, aux transports et à la logistique, parmi nombre d'utilisations possibles. Les SIG permettent également une mise en relation de données qui peuvent, sur le papier, sembler très éloignées. Quelle que soit la façon d'identifier et de représenter les objets et événements qui illustrent notre environnement (altitude, coordonnées, longitude & latitude, adresse, temps, etc.), les SIG permettent de réunir toutes ces dimensions autour d'un même référentiel, véritable colonne vertébrale du système d'information, et ainsi de plus facilement pouvoir le représenter et l'analyser. Il s'agit là d'une caractéristique clé du SIG.

Les formats d'échanges

Tout comme pour le BIM, il existe de nombreux formats d'échanges, afin de permettre une interopérabilité entre les nombreux logiciels existants. C'est un point relativement récent dans l'univers des SIG. En effet, dans la logique de fonctionnement actuelle où l'open source et les formats libre ont tendance à se développer, les éditeurs de logiciels de SIG ont assister à l'arrivée de ces formats d'échanges, permettant une interopérabilité entre les différents logiciels.

CityGML

Le CityGML (City Geography Markup Language) est un concept de modélisation et d'échanges de modèles de villes et de paysages en 3D qui s'est rapidement vu adopté à l'échelle internationale depuis sa première version sortie en 2008. Le CityGML est à la fois un modèle de données ouvertes standardisées et un format d'échange. Il permet de stocker et d'échanger des modèles 3D numériques de villes. Basé sur le langage informatique XML, il définit des manières de décrire la plupart des objets 3D courants présents dans les villes (bâtiments, routes, rivières, ponts, végétation et mobilier urbain) et les relations entre ces objets. Il définit les classes et les relations pour les objets topographiques les plus pertinents dans les villes et les modèles régionaux en ce qui concerne leurs propriétés géométriques, topologiques, sémantiques et esthétiques. Les hiérarchies entre les classes thématiques, les agrégations, les relations entre les objets et les propriétés spatiales sont également incluses.

Le format CityGML est un schéma d'application pour le "Geography Markup Language" version 3.1.1 (GML3). La version 1 de cette norme internationale pour l'échange de données spatiales a été publiée par l'Open Geospatial Consortium (OGC) en 2008. Elle a également la norme ISO TC211. La version 2 et actuelle dernière version du format CityGML date de 2011, alors que la version 3 est attendue pour début 2019 (Geospatial Consortium, Open, 2012).

Le Geography Markup Language (GML) est un langage informatique dérivé du XML permettant d'encoder, de manipuler et d'échanger des données géographiques. C'est un standard développé par *l'Open Geospatial Consortium* (OGC) afin de garantir l'interopérabilité des données dans le domaine de l'information géographique et de la géomatique.

L'Open Geospatial Consortium (OGC) est l'équivalent de *buildingSMART* mais concernant les domaines de la géomatique et de l'information géographique.

Le GML consiste en un format ouvert pour l'échange de données géographiques qui permet de construire des modèles de données spécifiques pour des domaines spécialisés, comme la géologie l'hydrologie ou l'urbanisme. En tant que format ouvert, le GML est interopérable avec toutes les spécifications OpenGIS de l'OGC et un très grand nombre de systèmes d'information géographique (SIG).

Le langage GML permet de décrire :

- Les objets géographiques
- Les systèmes de projection
- La géométrie
- La topologie
- Le temps
- Les unités de mesures
- Les attributs des objets géographiques.

L'objectif, du développement de CityGML, est de parvenir à une définition commune de l'ensemble des entités de base, des attributs et des relations d'un modèle de ville 3D. Ceci est particulièrement important en ce qui concerne la maintenance rentable et durable des modèles de villes 3D, permettant la réutilisation des mêmes données dans différents domaines d'applications.

Le format CityGML ne sert donc pas uniquement à représenter l'apparence graphique des villes, mais plutôt à gérer la représentation des propriétés et informations concernant la ville, contenues dans le modèle. Il existe donc un modèle géométrique et un modèle thématique.

- Le modèle géométrique permet de définir de manière cohérente et homogène les propriétés géométriques et topologiques des objets spatiaux dans les modèles de villes 3D. Il permet également d'avoir une représentation visuelle du projet et ainsi de faciliter le travail de représentation et de compréhension.
- Le modèle thématique correspond à une base de données. Il utilise le modèle géométrique et les différents champs thématiques que celui-ci contient afin de le compléter en apportant des informations géométriques et non géométriques, tels que le modèle numérique de terrain (MNT), les sites (bâtiments, ponts et tunnels), la végétation, l'utilisation des sols, les plans d'eau, les installations de transport, le mobilier urbain, etc.... D'autres objets, non modélisés, peuvent être également représentés de manière conceptuelle.

Étant donné la nature de son format "open source" et basée sur le langage XML, il est possible de créer des extensions de manière relativement simple. Il existe donc, en tant qu'extensions de domaines d'applications (Application Domain Extensions - ADE), des extensions du modèle de données CityGML s'appliquant à des champs spécifiques. Ces champs spécifiques sont généralement liés à des métiers particuliers et permettent des calculs ou des rendus précis. On parle alors de "logiciels métiers". Ces extensions peuvent permettre de faire du calcul thermique, du calcul de coût, de la création de planning, etc....

Le CityGML, bien qu'il soit un format indépendant, découle de nombreuses années d'évolutions de l'industrie du numérique. Le format, fonctionnant en langage dit objet, reprend de nombreux principes de fonctionnement que l'on retrouve à l'origine sur des logiciels de CAO/DAO ou de bureautique. Par exemple, le concept du "bloc" : si des objets spatiaux de forme égale apparaissent plusieurs fois à différentes positions dans le modèle, comme les arbres, ils peuvent être modélisés comme des prototypes "bloc" et ainsi être utilisés plusieurs fois dans le modèle de ville. Cette fonction peut permettre, entre autre, d'obtenir une table d'informations concertant ce bloc spécifique avec le nombre d'unités, la carte des emplacements, les dates d'implantation, ou encore toutes autres informations qui pourraient être utiles pour le détenteur du fichier ou pour les différentes parties prenantes. Tous les objets représentés graphiquement dans le modèle s'y trouvent, ainsi que toutes les informations à disposition sur ces objets, sur les relations entre ces objets, ainsi que d'autres informations qui ne sont pas forcément liées à un objet en particulier.

Le mode de fonctionnement et les principes constitutifs du format CityGML sont donc très proches de ceux du BIM et du format IFC. En effet, dans les deux cas nous retrouvons, de façon simplifiée, d'une part une représentation 3D du projet, et d'autre part, une base de données reprenant toutes les informations du modèle.

La similitude entre les deux va même plus loin puisque nous retrouvons pour le CityGML une classification en niveaux de détails (LOD – Level Of Development). Nous pouvons différencier cinq niveaux de développement (LOD) consécutifs, les objets devenant de plus en plus détaillés avec une LOD croissante, tant en ce qui concerne leur géométrie que leur différenciation thématique ou que les informations qu'ils contiennent. Les fichiers CityGML peuvent - sans y être obligés - contenir plusieurs représentations (et géométries) pour chaque objet dans différents niveaux de détails simultanément. La représentation finale dépend donc du niveau de détail choisi.

Outre, les propriétés géométriques des objets, des informations issues de calculs de logiciels métiers ou issues d'autres bases de données peuvent également être représentées en utilisant des apparences attribuées aux entités CityGML. Ces apparences représentent des propriétés caractéristiques observables de manière arbitraires à la surface de certains objets selon l'information à représenter, telles que le rayonnement

infrarouge, la pollution sonore ou les contraintes structurelles induites par les séismes, par exemple. De plus, les objets peuvent avoir des références externes, c'est-à-dire que la table d'informations fait référence ou lien vers d'autres informations qui ne font pas partie du modèle. Le but de ces références à des jeux de données externes est de pouvoir bénéficier d'un ensemble d'informations le plus complet possible, sans avoir forcément à importer dans le modèle toutes les informations existantes.

CityGML LOD

Comme énoncé précédemment, le CityGML comporte cinq différents niveaux de développement (LOD). Les LOD doivent refléter des processus de collectes de données indépendants avec des exigences d'applications différentes. De plus, les LOD facilitent une visualisation et une analyse des données efficaces. Dans un jeu de données CityGML, le même objet peut être représenté simultanément dans différents niveaux de détail, ce qui permet d'analyser et de visualiser le même objet à différents degrés de résolution. En outre, deux ensembles de données CityGML contenant le même objet dans différents niveaux de détails peuvent être combinés et intégrés. Cependant, il incombera à l'utilisateur ou à l'application de s'assurer que les objets de différents niveaux de détails font référence au même objet du monde réel.

- LOD 0 : régional : le niveau le plus grossier, il est essentiellement composé d'un modèle numérique de terrain (MNT) en deux dimensions et demi sur lequel une image aérienne ou une carte peut être "dрапée". Les bâtiments peuvent être représentés dans la LOD 0 par son emplacement au sol.
- LOD 1 : vue urbaine : cela correspond à un modèle numérique de terrain (MNT) en 3 dimensions avec des bâtiments représentés par des blocs géométriques simplifiés au toit plat.
- LOD 2 : quartier, projet : un bâtiment est représenté par une structure de toit différenciée et des surfaces délimitantes, sémantiquement classifiées.
- LOD 3 : modèle architectural (extérieur) et infrastructure/objets urbains : les modèles architecturaux comprennent des structures de mur et de toit détaillées pouvant inclure des portes et des fenêtres. Les objets de végétation, de mobilier urbain et de réseau sont détaillés.
- LOD 4 : modèle architectural (intérieur) : Le niveau LOD 4 complète le LOD3 en ajoutant les structures intérieures pour les bâtiments. Il y a donc les bâtiments composés de pièces, de portes intérieures, d'escaliers, de meubles, etc....

Dans tous les LOD, des informations d'apparence telles que des textures peuvent être mappées sur les structures. Les figures 6 et 7 permettent d'avoir une représentation visuelle des différences entre les niveaux de LOD.

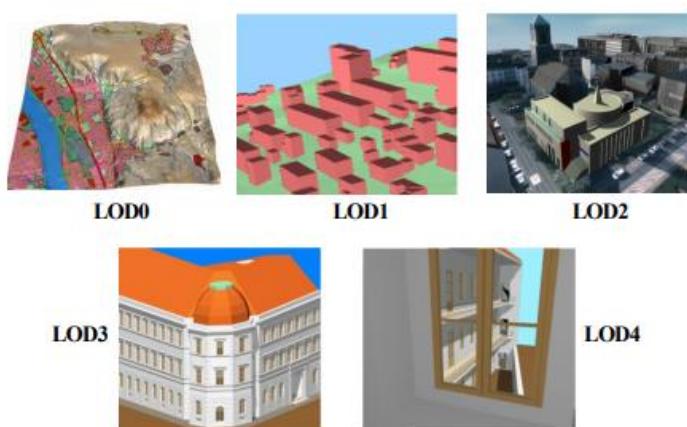


Figure 6 : Les cinq niveaux LOD définis par le format CityGML (source : IGG Uni Bonn)



Figure 7 : Représentation d'un bâtiment selon les 5 niveaux de LOD (source : Biljecki, 2016)

Il existe, aujourd'hui, plusieurs recherches terminées ou en cours, qui étudient la possibilité et l'intérêt de rajouter un niveau supplémentaire de LOD afin de pouvoir avoir une caractérisation plus fine et plus complète du modèle urbain (Löwner, 2013).

Les LOD sont également caractérisés par des niveaux de précisions différents et des dimensions minimales des objets représentés qui diffèrent aussi (voir Figure 8). Ces différenciations peuvent permettre d'évaluer la qualité et la précision d'un modèle. Les exigences de précisions données dans cette norme sont discutables et doivent être considérées comme des propositions de discussion. La précision est décrite comme l'écart type σ des coordonnées absolues du point 3D. La précision relative des points 3D sera ajoutée dans une future version de CityGML et est généralement beaucoup plus élevée que la précision absolue. Dans le LOD 1, la précision de la position et de la hauteur des points doit être inférieure ou égale à 5 m, alors que tous les objets avec une empreinte au moins égale à 6 m sur 6 m doivent être pris en compte. La précision de position et de hauteur du LOD 2 doit être de 2 m ou plus. Dans cette LOD, tous les objets ayant une empreinte au moins de 4 m \times 4 m doivent être pris en compte. Les deux types de précision dans le LOD 3 doivent être de 0,5 m et il est suggéré que l'empreinte minimale soit de 2 m \times 2 m. Enfin, la position et la hauteur du LOD 4 doivent être inférieures ou égales à 0,2 m. À l'aide de ces chiffres, la classification en cinq niveaux de détails peut être utilisée pour évaluer la qualité des jeux de données de modèles de villes en 3D. La catégorisation des LOD rend les jeux de données comparables et fournit un support pour leur intégration.

	LOD0	LOD1	LOD2	LOD3	LOD4
Model scale description	regional, landscape	city, region	city, city districts, projects	city districts, architectural models (exterior), landmark	architectural models (interior), landmark
Class of accuracy	lowest	low	middle	high	very high
Absolute 3D point accuracy (position / height)	lower than LOD1	5/5m	2/2m	0.5/0.5m	0.2/0.2m
Generalisation	maximal generalisation	object blocks as generalised features; > 6*6m/3m	objects as generalised features; > 4*4m/2m	object as real features; > 2*2m/1m	constructive elements and openings are represented
Building installations	no	no	yes	representative exterior features	real object form
Roof structure/representation	yes	flat	differentiated roof structures	real object form	real object form
Roof overhanging parts	yes	no	yes, if known	yes	yes
CityFurniture	no	important objects	prototypes, generalized objects	real object form	real object form
SolitaryVegetationObject	no	important objects	prototypes, higher 6m	prototypes, higher 2m	prototypes, real object form
PlantCover	no	>50*50m	>5*5m	< LOD2	< LOD2
...to be continued for the other feature themes					

Figure 8 : Tableau récapitulatif des LOD CityGML (issu d'une proposition de Albert et al., 2013)

Deux points importants doivent être ressortis de cette présentation du format CityGML. Tout d'abord c'est sa grande similarité avec le BIM et son standard IFC. En effet, les deux fonctionnent de la même façon avec un modèle numérique 3D d'un côté et une table de données contenant l'ensemble des informations de l'autre côté. Deuxièmement, le LOD 4 du CityGML, à l'échelle du bâtiment, est très similaire avec le concept du BIM. C'est cette similarité entre les deux qui nous intéresse ici.

Partie 3: Pourquoi et comment passer du BIM au CIM ?

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont utilisés depuis longtemps pour modéliser l'environnement et effectuer des analyses spatiales 2D de vastes zones. Cependant, avec l'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs disponible, des méthodes d'acquisition de données avancées et des flux de travail automatisés générant des données 3D détaillées ont vu le jour. Les modèles SIG sont devenus de plus en plus détaillés et ont commencé à contenir des modèles de bâtiments individuels, domaine traditionnel de la modélisation des informations de bâtiment (BIM).

Parallèlement, l'augmentation de la puissance de calcul et la disponibilité de logiciels de meilleures qualités ont permis aux méthodes BIM de se généraliser, bouleversant ainsi les plateformes de conception plus traditionnelles basées sur des dessins de CAO 2D. Les utilisateurs du logiciel BIM souhaitant intégrer les éléments environnants à leur travail, il est logique que le domaine BIM améliore actuellement ses normes afin de prendre en charge des informations environnementales telles que l'infrastructure. Les utilisateurs BIM se tournent également vers des ensembles de données SIG contenant des informations environnementales. Les deux domaines se chevauchent, donc, maintenant et modélisent de plus en plus les mêmes objets. Pourtant chaque domaine conserve son propre objectif et possède ses propres caractéristiques. Le domaine BIM se concentre sur les informations relatives à la conception et à la construction de bâtiment. Il contient donc des informations très détaillées sur tous les éléments physiques qui composent un bâtiment individuel de sa conception à sa construction. Dans le même temps, les SIG décrivent des informations sur l'environnement capturées à différents moments, ce qui permet de disposer de jeux de données moins détaillés mais plus régulièrement mis à jour et couvrant de vastes zones.

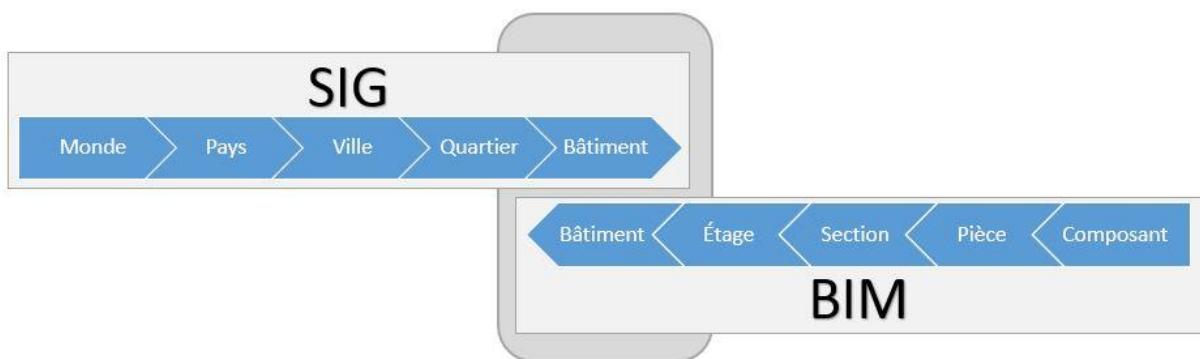


Figure 9 : Croisement entre les SIG et le BIM (adapté de Jacob Beetz, 2012)

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 9, c'est le bâtiment qui se situe à l'intersection de ces deux modèles. C'est, donc, lui qui doit permettre le passage du BIM à un niveau plus large, le CIM, en utilisant des bases de données de SIG. Afin de permettre ce rapprochement, qui se matérialise par une mise en commun des bases de données et des références spatiales pour constituer un seul ensemble, il faut disposer de systèmes permettant une interopérabilité. Pour cela, les standards IFC et CityGML, présentés respectivement dans la partie 1 et 2, sont très intéressant. En effet, comme nous avons pu le voir précédemment, ils disposent d'une classification similaire en utilisant les LOD. Ces niveaux permettent de fixer des échelons d'informations pour permettre une mise en commun des données. Les deux standards étant basés sur un langage XML, il n'y a pas de problème de compatibilité. Chaque format, au niveau de sa base de données, définit des catégories ayant une sémantique particulière. Chaque catégorie est ensuite divisée en sous-catégorie le nombre de fois nécessaire pour que l'ensemble des éléments du projet puisse être défini.

Nous pouvons voir sur la Figure 10, une illustration d'une partie des catégories définies par le CityGML. Chaque catégorie contient ensuite plusieurs sous-catégories. Comme déjà annoncé précédemment, la logique de fonctionnement en catégories imbriquées est la même pour les deux standards, il est en revanche nécessaire de vérifier la sémantique et le classement de chacun. En effet, afin de permettre la jointure des deux bases de données il faut que la sémantique des catégories soit la même. Il est également préférable que le classement des objets dans les catégories soit le même, bien qu'il soit possible d'effectuer une conversion afin d'affecter, de manière systématique, les éléments d'une catégorie IFC à une catégorie CityGML spécifique. Une fois ce protocole de conversion mis en place, il est applicable de manière systématique pour tout fichier IFC et CityGML.

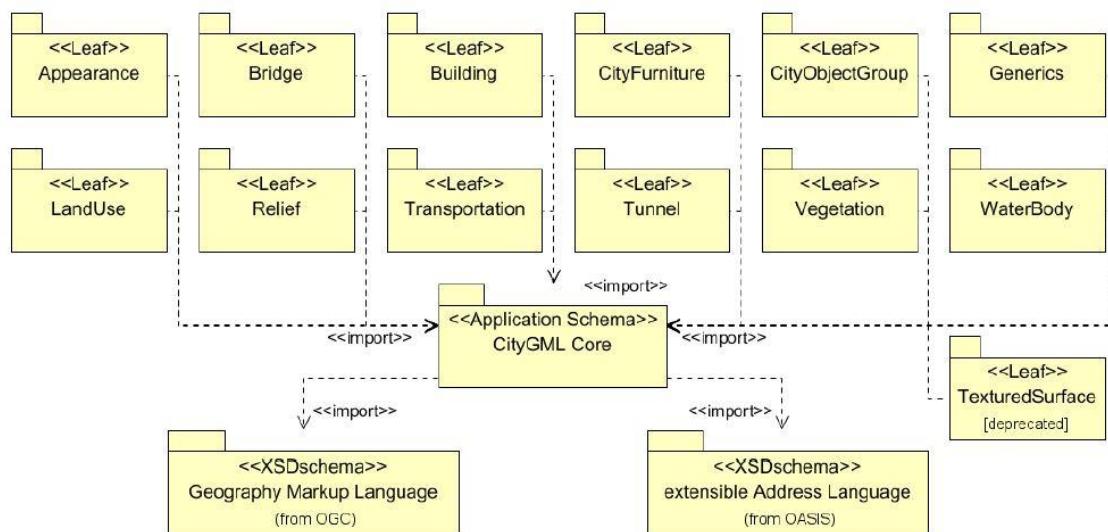


Figure 10 : Diagramme des packages UML illustrant les différents modules composant le format CityGML (source : Geospatial Consortium, Open. (2012). City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, version: 2.0.0.)

Étant donné qu'il s'agit de deux formats libres assez récents et qui connaissent des mises à jour régulières, il est important que ce protocole de conversion soit également en format libre et qu'il soit réactualisé à chaque nouvelle version d'un des deux formats. L'objectif serait qu'à terme la sémantique et les catégories soient parfaitement identiques dans les deux standards afin de ne plus avoir le besoin de ce protocole de conversion.

Avec la conversion des données BIM vers le standard CityGML nous obtenons alors un jeu de données uniques avec une base de données et le modèle géographique associé, au format IFC et pouvant être facilement représenté dans un logiciel de SIG traditionnel, il s'agit du CIM. La différence étant que maintenant celui-ci contient également, en plus du modèle de terrain et des informations géographiques traditionnelle, l'ensemble des informations du bâtiment rajouté via les données IFC issus du BIM.

En raison du chevauchement des fonctionnalités modélisées dans les deux domaines, ainsi que de leurs forces et faiblesses, nous pouvons avancer que l'intégration des données des deux domaines serait bénéfique et constituerait une avancée cruciale pour la modélisation future des villes en 3D. Cette intégration pourrait éviter des efforts inutiles dans la modélisation redondante et permettre de nouveaux flux de données dans les deux sens et de nombreuses opportunités. Les données BIM plus détaillées peuvent alimenter des données SIG plus générales, qui peuvent fournir le contexte qui manque généralement dans les données BIM. En poursuivant l'intégration des données SIG et BIM, les avantages pour les deux côtés peuvent être nombreux : avec les informations SIG contextuelles, les méthodologies BIM peuvent être mieux appliquées aux travaux d'infrastructures, et des modèles de villes 3D plus détaillés peuvent être construits en réutilisant ces données BIM. Le concept de ville intelligente peut véritablement se développer et effectuer un raisonnement intégré sur le terrain, les bâtiments et les infrastructures de la ville. Les analyses spatiales peuvent prendre en charge

différents niveaux de détails selon les besoins. Mais cela pose plusieurs questions : qui fournit les données ? Qui possède le modèle ? Pour quels intérêts ?

Pour les données issues de SIG la situation actuelle ne change pas, en revanche pour les données du BIM ce n'est pas le cas. En effet, aujourd'hui les données issues du BIM et produites par la maîtrise d'œuvre et l'ensemble des parties prenantes lors du projet, sont conservées par celles-ci. Afin de mettre en place le CIM, il est nécessaire que la ville, ou l'intercommunalité, en tant qu'organisme public en charge du territoire soit en possession de ces données.

Pourquoi passer au CIM ?

Les intérêts pour la puissance publique d'être en possession d'un CIM sont multiples. Cela lui permet de bénéficier de données précises sur l'ensemble de son espace d'actions, mais surtout sur un terrain suffisamment large pour pouvoir y effectuer des analyses spatiales de grande ampleur. C'est également une base pour une mise en place du concept de ville intelligente. Concrètement cela offre de nombreuses possibilités :

- Nous savons que dans un fichier BIM l'ensemble des éléments de construction du bâtiment sont pris en compte. Si, nous considérons la consommation en gaz de ville de l'ensemble des équipements de chauffage d'un bâtiment, les logiciels métiers du BIM permettent de définir une consommation théorique du projet. Maintenant en passant à l'échelle du CIM et en récoltant cette donnée pour l'ensemble des bâtiments consommant du gaz et connectés au réseau de gaz de ville, nous pouvons obtenir des informations précises et des modèles de consommation utilisables par la collectivité et les fournisseurs d'énergie. Ces données peuvent en plus être combinées avec des capteurs effectuant des relevés au niveau des compteurs par exemple afin de corriger les erreurs qui pourrait s'y trouver et d'affiner la précision du modèle.
- Le CIM regroupant des informations détaillées sur chaque bâtiment, peut être utilisé par la collectivité afin de vérifier que des obligations contractuelles ou réglementaires mise en place par celle-ci, ou par d'autres intervenants du projet, sont bien respectées. Il faut pour cela être sûr au préalable de la véracité des données contenu dans les modèles BIM.
- Étant donné qu'il regroupe des données sur l'ensemble des systèmes de la ville, nous pouvons envisager des simulations à l'échelle de celle-ci sur le trafic routier et analyser son impact sur les bâtiments, par exemple.
- En amont du projet de construction, un CIM peut être utilisé pour sélectionner l'emplacement de construction idéal d'un futur projet. Il peut également permettre d'anticiper la construction de la structure du réseau routier et du réseau électrique adéquat, mais aussi de commencer à travailler le design du bâtiment en fonction des réglementations en vigueur et de son environnement proche.
- Pour prévoir la construction d'un nouveau bâtiment, ou de la rénovation d'un bien ancien, le CIM permet de prévoir la logistique d'approvisionnement en matériaux et calibrer intelligemment les emplois du temps des différentes parties prenantes, en tenant compte des projets environnants, notamment dans le cas de l'aménagement d'une ZAC, par exemple, où de nombreux projets de construction se déroulent même temps dans un espace restreint.

L'usage du CIM permet donc de nombreuses applications possibles du côté de la collectivité qui a donc un besoin de mettre en place ce processus afin de pouvoir bénéficier des résultats de celui-ci. Mais les modèles CIM peuvent également être utilisés par de nombreux acteurs, à la fois par les architectes, les constructeurs et les planificateurs pour des projets de constructions individuelles, de campus et d'urbanismes de toutes tailles. Ces utilisateurs peuvent trouver toutes les données pertinentes pour leurs projets dans le CIM, poser des questions, lancer des analyses (solaire, ombre, microclimat, trafic, LEED, etc...) et collaborer en temps réel avec tous les membres de l'équipe.

Quelles données à disposition de la collectivité ?

Si on considère la situation telle qu'elle est actuellement, les collectivités disposent de peu de données concernant leur territoire. Elles sont donc obligées d'acheter ces données, pour un coût généralement relativement élevé. La question de l'obtention des données, et plus encore de la validité ou de la qualité de celle-ci est donc primordiale. Dans le cadre du BIM par exemple, les données produites lors du chantier sont généralement la propriété de l'entreprise titulaire du marché, sauf si cela a été négocié préalablement à la passation du marché.

Aujourd'hui via le Décret n° 2016-360 du 25 mars 2016 relatif aux marchés publics et plus précisément son article 42, le gouvernement français a retranscrit la DIRECTIVE 2014/24/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 26 février 2014 sur la passation des marchés publics. Celle-ci favorise l'utilisation du BIM en permettant aux États membres d'exiger, dans les marchés publics de travaux et les concours, l'utilisation d'outils électroniques particuliers tels que des outils de modélisation électronique des données du bâtiment (BIM). L'objectif de cette retranscription dans le droit français est d'inciter les différents acteurs à avoir recours à ces technologies et ainsi de développer l'usage du BIM en France. Pour aller plus loin dans cet objectif, l'état a mis en place le Plan Transition Numérique dans le Bâtiment (PTNB) en janvier 2015. Le PTNB poursuit trois objectifs :

- *"Expérimenter, capitaliser, convaincre et donner envie de s'approprier le numérique dans le quotidien de l'acte de construire."*
- *Permettre la montée en compétences des professionnels du bâtiment autour du numérique et le développement d'outils adaptés à tous les chantiers en privilégiant les objectifs de massification pour le déploiement et en accordant une attention toute particulière aux solutions BIM pour les petits projets.*
- *Développer un écosystème numérique de confiance en encourageant les travaux de normalisation et permettre ainsi l'interopérabilité des outils et logiciels."*

(Source : www.batiment-numerique.fr et <http://www.cohesion-territoires.gouv.fr> / feuille de route opérationnelle)

Le PTNB est un des trois plans d'actions mis en place par le gouvernement, en même temps que le "Plan d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique" (PACTE).

Enfin dernièrement, le 15 novembre 2018, à l'occasion de la première édition des Assises du logement, l'Etat a mis en place un "Plan BIM 2022" ayant pour but d'accompagner le secteur de la construction dans la voie du digital. Pour cela, le plan vise à généraliser et structurer la demande de BIM dans les projets en accompagnant et en sécurisant les maîtres d'ouvrages pour définir et encadrer leur besoin. Mais également, il a pour but d'accompagner l'ensemble des acteurs pour se doter des outils dont ils ont besoin pour travailler concrètement en BIM, en définissant les compétences nécessaires à acquérir et en soutenant leur apprentissage des compétences.

Aujourd'hui, il existe donc plusieurs plans d'actions en France visant à inciter les entreprises à utiliser le BIM et à le mettre en œuvre dans leur projet, mais toujours sur la base du volontariat. De plus, aucun texte de lois ne définit de règle concernant la propriété des données produites par le BIM, celle-ci étant défini de manière individuelle à chaque contrat passé. Or, pour que le CIM soit mis en place comme nous l'avons vu précédemment, il faut que la collectivité publique puisse disposer de ces informations à l'issue de la construction afin de compléter sa base de données, dans le but de posséder à terme, une modélisation de l'ensemble de son territoire. Pour cela deux possibilités s'offrent aux acteurs :

- La collectivité achète les données à l'entreprise ou les récupère en échange de réduction d'impôts, d'un accès à des marchés publics réservés, ou de toute autre forme de transaction financière ou équivalente.

- La collectivité impose de manière légale, la mise à disposition de ces données au regard du principe de l'intérêt général. Pour cela, il conviendrait de modifier l'article 42 du Décret n° 2016-360 du 25 mars 2016 relatif aux marchés publics de la façon suivante :

" I. - Les dispositifs utilisés pour communiquer par des moyens électroniques ainsi que leurs caractéristiques techniques ne ~~sont pas discriminatoires et ne restreignent pas~~ sont obligatoire pour l'accès des opérateurs économiques à la procédure de passation. Ils sont communément disponibles et compatibles avec les technologies de l'information et de la communication généralement utilisées. Les outils et les dispositifs de communication et d'échanges d'information par voie électronique répondent à des exigences minimales déterminées par arrêté du ministre chargé de l'économie.

II. - L'acheteur assure la confidentialité et la sécurité des transactions sur un réseau informatique accessible de façon non-discriminatoire selon des modalités fixées par l'arrêté mentionné au I. Les frais d'accès au réseau restent à la charge de l'opérateur économique. Les communications, les échanges et le stockage d'informations sont effectués de manière à assurer l'intégrité des données et la confidentialité des candidatures, des offres et des demandes de participation et à garantir que l'acheteur ne prend connaissance de leur contenu qu'à l'expiration du délai prévu pour leur présentation.

III. - L'acheteur ~~peut, si nécessaire, exiger~~ exige l'utilisation d'outils et de dispositifs qui ~~ne sont pas communément disponibles~~, tels que des outils de modélisation électronique des données du bâtiment ou des outils similaires. Dans ce cas, l'acheteur offre d'autres moyens d'accès au sens du IV, jusqu'à ce que ces outils et dispositifs soient devenus communément disponibles aux opérateurs économiques. doit obtenir la libre mise à disposition de l'ensemble des données produites par ces outils de modélisation électronique des données du bâtiment ou des outils similaires.

IV. - L'acheteur est réputé offrir d'autres moyens d'accès appropriés dans tous les cas suivants :

1° Lorsqu'il offre gratuitement un accès sans restriction, complet et direct par moyen électronique à ces outils et dispositifs à partir de la date de publication de l'avis d'appel à la concurrence ou de la date d'envoi de l'invitation à confirmer l'intérêt ou, en l'absence d'un tel avis ou d'une telle invitation, à compter du lancement de la consultation. Le texte de l'avis ou de l'invitation à confirmer l'intérêt précise l'adresse internet à laquelle ces outils et dispositifs sont accessibles ;

2° Lorsqu'il veille à ce que les opérateurs économiques n'ayant pas accès à ces outils et dispositifs ni la possibilité de se les procurer dans les délais requis, à condition que l'absence d'accès ne soit pas imputable à l'opérateur économique concerné, puissent accéder à la procédure de passation du marché public en utilisant des jetons provisoires mis gratuitement à disposition en ligne ;

3° Lorsqu'il assure la disponibilité d'une autre voie de présentation électronique des offres."

Figure 11 : Article 42 du Décret n° 2016-360 du 25 mars 2016 relatif aux marchés publics, (modification en rouge) (source : legifrance)

Nous pouvons également imaginer que la collectivité passe un accord avec une entreprise tierce, et mette en place un contrat de type délégation de service public pour que cette entreprise gère le CIM à la place de la ville. L'accès aux données du CIM pourrait également être vendu aux différentes entreprises pour qui l'intérêt serait grand de pouvoir disposer d'une base complète d'informations sur le territoire afin de déterminer l'emplacement de leurs futurs projets, de consulter des données pertinentes pour le développement de ceux-ci, etc...

Conclusion

Comme nous l'avons vu dans ce rapport, le BIM est en passe de devenir la norme dans les projets de construction. Cette norme ne doit être qu'une étape avant de tendre le plus rapidement possible vers le CIM. Celui-ci, est le résultat d'une coopération forte entre les différentes parties prenantes du projet, autour du BIM, puis regroupé sur un fichier SIG. En introduction, la question se posait de savoir comment passer du BIM (Building Information Modeling) vers le CIM (City Information Modeling) ?

On peut dire qu'il est nécessaire de passer par des fichiers intermédiaires, des formats d'échange de données. Il est important que les fichiers de données soient sémantiquement bien classés, que le niveau de LOD soit clair, que la base de données du SIG soit rigoureuse également. Les différents éléments sont ensuite joints en utilisant des formats d'échanges spécifiques : IFC pour le BIM et CityGML pour le SIG. Comme il a été présenté dans la partie 3 du rapport, ce passage de l'un à l'autre peut être fait au moyen d'un protocole de conversion, ou directement, une fois les deux standards modifiés pour être mis en accord.

Concernant ce rapport, la principale limite est le fait que la partie informatique pure, c'est-à-dire le code, ou la programmation en XML par exemple, n'ont pas été abordé. L'aspect technique est donc absolument à prendre en compte avant d'envisager une mise en application. Une deuxième limite concerne la mise à disposition des données par les entreprises pour les collectivités. Dans le projet cette mise à disposition est imposée de manière légale, par modification d'un article de loi. Dans la réalité on peut se demander si cette loi pourrait réellement être votée ou si elle ne rencontrerait pas des oppositions de la part de grands groupes du bâtiment qui pousseraient pour empêcher son vote par exemple.

Enfin, que ce soit pour le BIM ou pour le CIM, l'objectif est toujours de pousser la précision des modèles plus loin, de les compléter afin qu'ils permettent d'obtenir des résultats et des simulations toujours plus précises. Le CIM est-il une finalité en soi, ou n'est-il pas qu'une nouvelle étape intermédiaire avant d'être complété par des données encore plus précises sur les habitants et leurs modes de vie. Des données que les objets connectés et la domotique pourraient peut-être fournir à l'avenir ?

Bibliographie

- Azhar, S et al. (2012) 'Building information modeling (BIM): now and beyond', Australasian Journal of Construction
- Azhar, S., and Richter, S. (2009) 'Building Information Modeling (BIM): Case Studies and Return-on-Investment Analysis', Proceedings of the Fifth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-V), Istanbul, Turkey, 1378-1386
- Azhar, S., Nadeem, A., Mok, J.Y.N., and Leung, B.H.Y. (2008b) 'Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Visual Interactive Modeling and Simulation for Construction Projects', Proceedings of the First International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-I), Karachi, Pakistan, August 4-5
- Beddiar, K., & Imbault, F. (2017). BIM et énergétique des bâtiments. Dunod.
- Biljecki, F., Ledoux, H., Stoter, J. (2016): An improved LOD specification for 3D building models.
- Carmona, J. and Irwin, K. (2007) 'BIM: Who, What, How and Why', Building Operating Management, October 2007
- Computers, Environment, and Urban Systems, vol. 59, pp. 25-37.
- Donkers, S. (2013). Automatic generation of CityGML LoD3 building models from IFC models.
- Eastman, C, Teicholz, P., Sacks, R. and Liston, K. (2011) BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, 2nd ed., NY: John Wiley and Sons
- Engelbart, D. C. (1962). Augmenting human intellect: A conceptual framework.
- Geospatial Consortium, Open. (2012). City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, version: 2.0.0.
- Jacob Beetz. Gebruik van 3D gebouw-modellen in 3D GIS: Building information modelling (BIM/IFC) voor beginners. Geonovum 3D Pilot Fase II Slotdag, November 2012. [5]
- Kymmell, W. (2008) Building Information Modeling: Planning and Managing Projects with 4D CAD and Simulations, USA:McGraw Hill Construction
- Laiserin J. (2003), "The BIM Page", The Laiserin Letter.
- Löwner MO., Benner J., Gröger G., Häfele KH. (2013) New Concepts for Structuring 3D City Models – An Extended Level of Detail Concept for CityGML Buildings. In: Murgante B. et al. (eds) Computational Science and Its Applications – ICCSA 2013. ICCSA 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol 7973. Springer, Berlin, Heidelberg
- Stine, J.D. (2011) Design Integration Using Autodesk Revit® 2012, Mission, KS: SDC Publications
- Valente C. (2015) BIM & BTP: Construire grâce à la maquette numérique.

Webographie

- Site d'Objectif BIM, www.objectif-bim.com, Consulté le 15 janvier 2019
- Site du projet geobim de la Delft University of Technology, 3d.bk.tudelft.nl/projects/geobim, Consulté le 15 janvier 2019
- Site national du Plan Transition Numérique dans le Bâtiment, www.batiment-numerique.fr, Consulté le 15 janvier 2019
- Site du MINISTÈRE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES ET DES RELATIONS AVEC LES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES, www.cohesion-territoires.gouv.fr, Consulté le 15 janvier 2019
- Site de The Bim Center, www.thebimcenter.com, Consulté le 15 janvier 2019

Directeur de recherche

Corentin Caillé

PFE/DAE5

Sébastien Larrive

UIT/Réseau

2018-2019

From BIM to CIM

Changement d'échelle : de la maquette numérique du bâtiment à celle de la ville

Résumé : Le BIM est une technologie et un processus visant à améliorer la réalisation de bâtiments en construisant une maquette numérique et une base de donnée associée, permettant avant la phase de construction, de résoudre les problèmes liés à la conception du bâtiment. Un fichier BIM contient donc toutes les informations du bâtiment. Celui-ci peut être "ajouté" à une base donnée afin de former le CIM. En partant d'une base de donnée SIG sur un territoire précis, et en utilisant un format d'échange de données, le CityGML, le fichier BIM peut être intégré, via un autre format d'échange, le format IFC. Une base de donnée d'un territoire est complétée par les données précises d'un bâtiment, avec à terme l'ensemble des bâtiments, et donc la ville entièrement modélisée. Cette modélisation, le CIM, comporte une maquette numérique du territoire et l'ensemble des données associées, et permet de mettre en place de nombreuses modélisations et simulations pour l'étude et la gestion du territoire.