

## Avant-propos

Le BIM multi-échelle a le potentiel pour devenir un puissant outil d'aide à la décision pour la planification urbaine. Il peut être utilisé pour faciliter de nombreuses applications, relevant de plusieurs domaines tels que les simulations de vent, les études énergétiques, les études de bruit et divers types d'analyses qui nécessitent de placer une conception architecturale planifiée dans son contexte et pouvoir en suivre l'implantation et l'évolution dans un contexte urbain, en la connectant avec d'autres composantes urbaines comme les réseaux, les infrastructures routières, etc. La maquette urbaine est devenue également un support incontournable permettant de mieux communiquer avec l'ensemble des acteurs et parties prenantes sur des problématiques urbaines.

Cet ouvrage présente les bases théoriques et pratiques pour la mise en œuvre d'un BIM multi-échelle. Il traite les questions relatives à l'acquisition, la modélisation, l'intégration des données et le partage des informations dans un cadre interopérable. Chaque chapitre analyse et fournit les bases d'intégration BIM et SIG dans le contexte de la gestion urbaine, une étape préliminaire pour concrétiser une gestion intelligente et durable d'un territoire. Cet ouvrage présente également des cas d'étude pratiques illustrant certains aspects d'utilisation du concept du BIM multi-échelle pour répondre à certaines questions urbaines, notamment la segmentation des données Lidar pour la modélisation des maquettes BIM, l'intégration BIM et SIG pour les simulations de valeurs immobilières ainsi que l'apport du BIM et SIG pour la rénovation urbaine.

## Remerciements

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont marqué mon parcours professionnel et qui ont contribué à l'évolution de ma carrière d'enseignant-chercheur. Je remercie également le département de Géodésie Topographie à l'IAV Hassan II.

Mes remerciements les plus sincères vont au professeur Hassane Jarar Oulidi qui a collaboré à la rédaction de cet ouvrage. Je le remercie pour l'ensemble de nos échanges. Ce fut une belle expérience de partage et de collaboration.

Je remercie aussi l'équipe d'ISTE Editions pour leur travail professionnel de grande qualité.

Je souhaite ensuite adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des étudiants et doctorants qui ont consacré de leur temps et de leurs efforts à faire progresser nos questions de recherche, particulièrement Mme Siham El Yamani, Mlle Oumayma Moufid et M. Zouhair Ballouch qui ont contribué à la rédaction de cet ouvrage.

Je ne manquerai pas de remercier mes parents pour leur soutien indéfectible, leur confiance et leurs conseils. Merci de m'avoir tout donné pour que je sois à la hauteur de vos attentes.

Je dédie tout particulièrement ce travail à mon époux pour son soutien et ses encouragements. Je le remercie pour les sacrifices faits à mon égard. Merci pour la joie et le bonheur que tu m'apportes dans la vie.

Rafika HAJJI

Je tiens à remercier le personnel et les professeurs de l'École Hassania de Travaux Publics (EHTP), notamment le département de mathématiques, informatique et géomatique.

Un merci spécial à ma femme Amina pour son soutien indéfectible et ses encouragements.

Hassane JARAR OULIDI

# Introduction

## Contexte général

### ***BIM et SIG 3D pour une modélisation multi-échelle de l'espace urbain***

L'espace urbain est à la fois riche et complexe. Sa modélisation doit prendre en charge la gestion de cette complexité urbaine à travers le développement de modèles 3D géométriquement et sémantiquement riches. Quels que soient les usages, la mise à disposition d'un fond de plan 3D est communément admise comme besoin crucial qui impose aux organismes producteurs des données de référence d'orienter les développements vers l'acquisition de référentiels géographiques 3D.

L'objet « bâtiment » représente une composante de référence pour les infrastructures de données spatiales, qui partagent des relations avec d'autres objets urbains comme les infrastructures, les installations de villes, les parcelles cadastrales, etc. Dans la directive Inspire, le thème « bâtiment » fait partie des données de référence qui sont requises dans l'infrastructure européenne des données. Selon la directive Inspire (2013), la définition d'un bâtiment prend un sens très large :

« Les bâtiments sont des constructions en surface et/ou en sous-terrain qui sont utilisées pour abriter des humains, des animaux,

des choses, de la production de marchandises ou des prestations de services et qui se réfèrent à n'importe quelle structure construite ou érigée de manière permanente sur son site. »

Au sein d'une diversité urbaine, le bâtiment est un objet de référence qui se trouve au centre de plusieurs problématiques et fait l'objet de plusieurs études. Le bâtiment est entre autres un espace de vie, de travail et d'activités humaines, qui consomme des ressources et qui définit et contrôle la dynamique de l'espace urbain.

Face à un grand éventail d'applications et à des besoins d'utilisateurs à la fois variés et évolutifs, la consistance d'un modèle 3D à vocation générale est difficile à mettre en œuvre en termes de types d'objets à représenter et de leurs spécifications en précision géométrique et sémantique, étant donné que les niveaux de détails et de précision sont fortement liés à l'intérêt porté par tout un chacun sur les objets 3D à représenter dans le cadre d'une application spécifique.

Le processus de numérisation d'un bâtiment permet de mener à une représentation 3D complète, géométriquement fiable et précise, annotée sémantiquement sous la forme d'un système d'information de bâtiment, communément appelé BIM (Building Information Modeling). À travers un processus collaboratif, le BIM recentre les pratiques autour d'une maquette numérique très détaillée contenant des informations qualitatives et quantitatives sur un bâtiment, et permettant à l'ensemble des acteurs (maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs, exploitants, propriétaires, etc.) de coordonner leurs contributions tout au long du cycle de vie du projet. Ce processus permet d'optimiser les méthodes de construction, de gestion et d'exploitation des bâtiments et de gagner en efficacité en termes de coût et de délais nécessaires à l'élaboration d'un projet.

Le BIM trouve ses origines en 1962, où les prémisses de base ont été établies en premier par Douglas C. Engelbart, qui avait décrit dans son article « Augmenting Human Intellect » la manière avec laquelle l'architecte peut percevoir l'évolution de son projet avec des ajustements des flux d'informations à travers un design orienté objet. En 1975, Eastman, qui a établi la liaison entre la conception architecturale d'un bâtiment et le domaine de l'informatique, a ensuite développé et implémenté un système de description de bâtiment

(Building Description System) qui pose les bases de la modélisation objet à travers un modèle qui encapsule différentes informations et leur gestion au sein du BDS (Eastman 1975), dans lequel « l'élément » est l'unité de base à laquelle sont rattachées des informations.

Aujourd'hui, le BIM est l'une des innovations technologiques majeures dans le domaine de la construction, permettant d'offrir un socle d'informations 3D servant de base pour des études et simulations à l'échelle urbaine, notamment des études environnementales, des simulations d'énergie, de bruit, de valeur immobilière, etc. Le BIM permet de caractériser la géométrie des bâtiments, les relations spatiales, les quantités ainsi que les propriétés des éléments de construction, le coût, les matériaux, etc. Au-delà de son apport dans l'économie de la construction à travers une optimisation des coûts et des délais, le BIM répond au développement durable grâce à une modélisation permettant d'intégrer des informations sur les éléments de la maquette pour des constructions intelligentes et durables. À la livraison du bâtiment, une version du BIM « tel que construit » représente l'état réel du bâtiment qui aide les *facility managers* à entreprendre des opérations de maintenance et de gestion intelligente du bâtiment.

À une échelle urbaine, les SIG se révèlent être des systèmes performants pour la gestion des phénomènes spatiaux. Ils doivent ainsi s'aligner sur le besoin accru en données tridimensionnelles riches et bien structurées pouvant offrir des fonctionnalités avancées dans un espace 3D. Le problème ne se réduit pas à une simple extension des solutions SIG 2D par l'ajout d'une troisième dimension, mais requiert un travail consistant de modélisation, de représentation, de stockage et d'analyse spatiale 3D pour une gestion optimale des données 3D.

À travers la capture, la modélisation, le stockage, la manipulation, l'analyse, le partage et la représentation des données géographiquement référencées, le SIG 3D décrit l'information sur l'environnement telle qu'elle est capturée à différents moments dans un environnement 3D. Cependant, il permet l'accès à des données moins détaillées que les données provenant du BIM, mais plus actualisées et couvrant une vaste étendue spatiale (Worboys et Duckham 2004), ce qui confère aux BIM et SIG 3D deux échelles de modélisation et d'analyse différentes.

Plus communément, le développement d'un SIG 3D est motivé par la demande accrue en information 3D, et aussi par la révolution technologique enregistrée dans le domaine de la 3D portant sur l'acquisition des données 3D, la reconstruction et la modélisation 3D, les nouvelles techniques de visualisation 3D comme la réalité virtuelle, augmentée ou mixte ainsi que l'analyse spatiale 3D. Le défi pour aujourd'hui est de choisir, dans un éventail de solutions d'acquisitions 3D, qui se développe continuellement et de plus en plus accessible à des utilisateurs initialement non experts, la technique la plus appropriée à la modélisation d'une problématique spatiale donnée. La difficulté réside plutôt dans la mise en œuvre de solutions de traitement, de stockage optimisé et d'extraction de connaissances à partir d'un jeu de données 3D. De plus, la qualité et l'intégrité des données acquises sont deux paramètres importants à prendre en considération dans l'élaboration des maquettes 3D.

### ***Intégration BIM et SIG 3D : un nouveau paradigme pour un espace urbain smart et durable***

La planification et la gestion de l'environnement bâti requièrent au moins deux niveaux d'analyse et de planification, que ce soit à l'échelle de la ville ou du quartier (SIG) ou à l'échelle du bâtiment (BIM). Une intégration des deux modèles BIM et SIG 3D sera bénéfique afin d'adapter les territoires urbains à l'ère numérique. La tendance actuelle de recherche tend vers l'intégration des approches relevant de l'information géographique (SIG 3D) et celles relevant de l'architecture et l'ingénierie (BIM). L'enjeu est de faire une modélisation multi-échelle de l'espace urbain.

Le résultat de cette intégration est le GeoBIM : c'est un processus hybride qui combine les informations provenant de la micro-échelle BIM (bâtiment) et celles de la macro-échelle SIG (quartier, ville, région, etc.). Le BIM, grâce à ses informations très détaillées et précises sur les éléments d'un bâtiment, alimente les informations représentées par les SIG ; ce dernier contient des informations plus générales et s'étendant à un contexte spatial plus large.

Un des exemples de la potentialité des SIG 3D est leur capacité à offrir une plateforme pour la simulation des thématiques urbaines liées au concept des villes intelligentes (*smart cities*). Si l'enjeu majeur pour les politiques d'aujourd'hui est la construction durable et la mise en place de stratégies vertes

pour les nouvelles villes, la mise à niveau des bâtiments existants pour répondre aux axes de développement durable n'est pas à négliger. Le SIG 3D joue un rôle majeur dans ce contexte. D'un autre côté, le BIM fournit des informations très détaillées et bien structurées sur le bâtiment qui permettent de le concevoir, le construire, le gérer et l'exploiter de manière durable et intelligente.

Face à une dynamique urbaine soutenue et tenant compte des changements économiques, sociaux et environnementaux ainsi que des réformes engagées, les territoires de demain sont appelés à développer une capacité de résilience et de durabilité à même de relever les défis majeurs auxquels ils sont confrontés. C'est ainsi que la mise en place d'un nouveau modèle d'aménagement et d'urbanisme répondant aux nombreux défis de compétitivité, de cohésion sociale, de préservation des ressources et de développement durable et d'innovation requiert le développement de concepts et de nouvelles approches en matière d'aménagement et une meilleure intégration des opportunités offertes par les nouvelles technologies 3D. L'intégration SIG 3D et BIM permet d'étudier la relation dynamique entre les conditions physiques et environnementales, la géométrie urbaine et les propriétés de chaque bâtiment. Une telle intégration permettra d'atteindre des espaces urbains intelligents, résilients et durables (Niu *et al.* 2015). Disposer de maquettes urbaines multi-échelles permet non seulement de répondre aux exigences actuelles en matière d'analyse et de gestion de l'espace urbain, mais aussi aux besoins futurs et prospectifs des villes de demain.

Cependant, l'intégration BIM et SIG 3D fait ressortir plusieurs complexités d'ordre conceptuel et technique. Cela est principalement dû aux dissimilarités entre les deux domaines en termes d'échelle spatiale, de niveau de granularité et de détail (LoD, Level of Detail), de méthodes de représentation de la géométrie, de stockage et d'accès, ainsi qu'aux dissimilarités d'ordre sémantique. On distingue principalement trois niveaux d'intégration BIM et SIG 3D : une intégration à l'échelle des données, une intégration à l'échelle des applications et une intégration à l'échelle des modèles. Ce dernier niveau est plus flexible où l'un des deux modèles (BIM ou SIG 3D) est étendu à travers son standard pour intégrer les données et éléments de l'autre modèle. Un autre niveau plus avancé d'extension est le développement d'un métamodèle qui assure la médiation entre les deux modèles à un niveau conceptuel plus élevé. Dans la littérature, les contributions dans l'intégration BIM et SIG 3D sont notables, mais elles sont loin de résoudre tous les problèmes techniques inhérents à cette

intégration (Biljecki et Tauscher 2019). Il s'agit d'un créneau de recherche encore en activité.

### ***L'interopérabilité : un défi majeur pour le BIM multi-échelle***

Dans le contexte général des Data Sciences, l'échange et le partage de données sont incontournables. Devant l'hétérogénéité des systèmes, des outils et des formats, l'interopérabilité est reconnue comme un défi majeur dans l'intégration des données multisources. L'interopérabilité est la capacité à garantir que les données générées par un utilisateur puissent être interprétées correctement par tous les autres utilisateurs (Shen *et al.* 2010). L'interopérabilité des données permet un échange fiable et efficace de l'information : c'est une étape préalable à l'intégration efficace des systèmes dans un contexte de collaboration. Le but est d'éliminer ou de réduire les interventions manuelles chronophages et sources d'erreurs inhérentes à l'exploitation ou à l'échange de données entre logiciels et utilisateurs.

L'interopérabilité dans la modélisation 3D urbaine est l'objectif fondamental derrière le développement du standard CityGML. CityGML est un modèle de données ouvert pour le stockage et l'échange de modèles de villes 3D. L'objectif du développement de CityGML est d'arriver à une définition commune des entités de base, des attributs et des relations d'un modèle de ville 3D. CityGML repose sur un modèle de données géométrique, topologique et sémantique très riche. Il assure également une représentation multi-échelle à travers un certain nombre de niveaux de détails définis pour les objets urbains (Gröger *et al.* 2012). Le niveau de détail le plus communément utilisé est celui des bâtiments.

Dans le domaine de l'ingénierie de la construction, IFC (Industry Foundation Classes) a été proposé comme standard basé sur un modèle ouvert orienté objet. IFC est conçu pour modéliser les objets d'un BIM en termes d'information géométrique, sémantique et des relations entre les éléments pour faciliter la coordination interdisciplinaire des modèles d'information sur le bâtiment, le partage et l'échange de données entre applications compatibles IFC ainsi que le transfert et la réutilisation des données dans des contextes différents.

Au cours des dernières années, un certain nombre d'études ont été menées pour examiner le potentiel d'intégration du SIG et des modèles d'information du bâtiment (BIM) (GeoBIM) à travers la normalisation des échanges entre

IFC et CityGML. Cependant, les problèmes techniques inhérents à la gestion de l'interopérabilité entre les deux schémas sont loin d'être maîtrisés et mobilisent encore plusieurs groupes de recherche comme le groupe de travail GeoBIM de l'EuroSDR (Noardo *et al.* 2020).

## Contribution scientifique de l'ouvrage

Cet ouvrage traite des questions importantes autour du concept du « BIM multi-échelle » sous une perspective de gestion urbaine intelligente et durable. Sa principale contribution réside dans la valorisation du potentiel du BIM multi-échelle en matière de développement d'une véritable stratégie territoriale permettant aux professionnels et chercheurs de placer les données territoriales dans des contextes d'analyse et d'interprétation en vue de produire une connaissance urbaine intégrée au service d'une gestion territoriale intelligente. Les concepts traités et les cas d'usages pratiques présentés à travers cet ouvrage apporteront des briques essentielles pour le développement et la mise en œuvre des villes intelligentes (*smart cities*). L'ouvrage permet ainsi de :

- dresser un état des lieux en matière de technologies, de méthodes et d'approches permettant la mise en place d'un BIM multi-échelle ;
- traiter les aspects conceptuels et techniques autour de l'interopérabilité des modèles BIM et SIG 3D et leur intégration sous le concept du GeoBIM ;
- permettre aux professionnels du domaine des sciences géospatiales et celui de l'architecture et la construction de partager une vision commune sur le BIM et le CIM et appréhender leur intégration ;
- présenter trois études de cas pratiques illustrant des exemples concrets de mise en place d'un BIM multi-échelle.

## Structure de l'ouvrage

Afin de poser le problème de manière structurée, cet ouvrage est divisé en huit chapitres. **Le chapitre 1** présente une vue générale sur les concepts de base de la technologie BIM. Il fait un tour d'horizon sur les notions fondamentales relatives au concept du BIM sous ses différentes dimensions conceptuelle et technique.

Le chapitre 2 présente les différentes méthodes de collecte et d'acquisition des données 3D. Ce chapitre se focalise sur les techniques et les approches pour la production des données 3D d'une maquette numérique. Il propose un aperçu sur les techniques et outils de numérisation 3D les plus courants avec une réflexion étendue aux relevés 3D d'environnements urbains de manière générale, préalable à la production de maquettes urbaines. Ce chapitre propose également une discussion autour du choix des techniques et méthodes et l'intégration des sources de données multiples et hétérogènes pour la numérisation 3D de l'espace urbain.

Le chapitre 3 a pour objectif de traiter les méthodes de modélisation pour l'élaboration d'un BIM multi-échelle. Ce chapitre présente les bases de production d'une maquette numérique et les principales approches développées pour la reconstruction 3D des objets de cette maquette, en particulier les bâtiments.

Le chapitre 4 traite l'interopérabilité des modèles et donne un aperçu global sur les standards Open BIM offrant la possibilité aux professionnels de travailler dans un environnement d'échange qui garantit l'interopérabilité des logiciels dans le cadre de la maquette numérique « libre » et normalisée.

Le chapitre 5 explique le principe permettant de combiner la technologie BIM et SIG sous le concept du GeoBIM. Il met en exergue les avantages du GeoBIM au regard de plusieurs thématiques et discute les derniers aboutissements de la recherche dans ce domaine.

Cette analyse, à la fois théorique et technique, est appuyée par trois chapitres présentant trois études de cas :

- intégration BIM et SIG 3D pour l'évaluation immobilière (chapitre 6) ;
- segmentation sémantique des données Lidar aéroporté pour l'élaboration d'une maquette urbaine (chapitre 7) ;
- utilisation des maquettes BIM pour la rénovation des espaces urbains (chapitre 8).

L'ouvrage se termine par une conclusion générale qui résume les points saillants du concept du « BIM multi-échelle » en posant quelques pistes de réflexion en la matière.

## Public concerné

De par son contenu couvrant l'aspect multidimensionnel de la modélisation multi-échelle de l'espace urbain, cet ouvrage est destiné d'une part, à une large communauté de professionnels exerçant dans le domaine de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'architecture, de l'ingénierie génie civil, de l'ingénierie topographique et géomatique et d'autre part, aux chercheurs, aux universitaires et aux doctorants souhaitant se spécialiser dans le domaine du BIM appliqué à l'intelligence territoriale et urbaine.

## Bibliographie

- Biljecki, F. and Tauscher, H. (2019). Quality of BIM–GIS conversion. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 4.
- Eastman, C.M. (1975). The use of computer instead of drawings in building design [Online]. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/234643558\\_](https://www.researchgate.net/publication/234643558_).
- Gröger, G., Kolbe, T.H., Nagel, C., Häfele, K.H. (2012). OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard. Document, Open Geospatial Consortium, Wayland, MA.
- Inspire (2013). INSPIRE Data Specification on Buildings – Technical Guidelines. [Online]. Available at: <https://inspire.ec.europa.eu/id/document/tg/bu>.
- Niu, S., Pan, W., Zhao, Y. (2015). A BIM-GIS integrated web-based visualization system for low energy building design. *Procedia Engineering*, 121, 2184–2192.
- Noardo, F., Harrie, L., Arroyo Otori, K., Biljecki, F., Ellul, C., Krijnen, T., Eriksson, H., Guler, D., Hintz, D., Jadidi, M.A., Pla, M., Sanchez, S., Soini, V.-P., Stouffs, R., Tekavec, J., Stoter, J. (2020). Tools for BIM-GIS integration (IFC georeferencing and conversions): Results from the GeoBIM benchmark 2019. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 502.
- Shen, W., Hao, Q., Mak, H., Neelamkavil, J., Xie, H., Dickinson, J., Thomas, R., Pardasani, A., Xue, H. (2010). Systems integration and collaboration in architecture, engineering, construction, and facilities management: A review. *Advanced Engineering Informatics*, 24(2), 196–207.
- Worboys, M.F. and Duckham, M. (2004). *GIS: A Computing Perspective*. CRC Press, Boca Raton, FL.