

VERS LA CRÉATION D'UN MODÈLE 3D INTERROGEABLE D'UNE VILLE INTELLIGENTE

Nawel Lafioune, M. Ing, M. Arch.

Étudiante au doctorat

École de technologie Supérieure

Université du Québec

Nawel.lafioune.1@ens.etsmtl.ca

Michèle St-Jacques, ing., Ph.D.

Professeure titulaire

Département de génie de la construction

École de technologie Supérieure

Université du Québec

Michele.st-jacques@etsmtl.ca

RÉSUMÉ

Objectif – L'objectif de cet article est la création d'un nouveau modèle 3D numérique de la ville, interrogeable, pour aider les gestionnaires à une meilleure prise de décision.

Conception / méthodologie / approche – L'article identifie les connaissances de base sur la gestion des données ; détermine les éléments clés qui aident à la conception du nouveau modèle ; analyse cinq modèles de villes ; présente les constats et propose des tendances d'analyse pour le nouveau modèle. L'article discute les concepts des modèles existants ; explique la valeur ajoutée du modèle proposé ; et démontre sa robustesse.

Constatations – L'interconnexion entre les systèmes de la ville est possible grâce à la numérisation des données, et à l'intégration de la nouvelle technologie dans les différents processus de gestion. Il existe plusieurs modèles 3D de villes, mais aucun modèle identifié pendant la recherche n'est interrogeable dans plusieurs secteurs.

Limites – Réussir la conception de ce modèle ne peut se réaliser sans l'appui d'un mandat public. Quelques limites peuvent se présenter comme le risque de la sécurité de l'information ; le risque de non-acceptabilité politique ; etc.

Originalité / valeur – Le modèle proposé est interrogeable, performant et unique par sa capacité d'interconnecter les systèmes de la ville, d'analyser les données en temps réel afin d'extraire les informations pertinentes pour piloter la ville en temps réel et avec une vision globale.

Mots-clés : Modèle 3D de la ville, *Blockchain*, IOTA, ville intelligente, BIM, SIG.

Type de l'article Revue de la littérature

1. INTRODUCTION

La ville est un système des systèmes (Wu & al, 2018). Les systèmes de la ville se classent en quatre types : la population, les instances gouvernementales/municipales, le territoire et les infrastructures (Dameri, 2014). « Plus de 3,3 milliards de personnes habitent en ville dans le monde. Les villes occupent aujourd'hui à peine 2 % de la surface du globe, elles abritent 50 % de la population mondiale, consomment 75 % de l'énergie produite et sont à l'origine de 80 % des émissions de CO₂ » (Soucy, 2016). La prise de décision dans la gestion d'une ville dépend de plusieurs enjeux non seulement d'ordre économique, social et environnemental, mais aussi, des intérêts divergents et contradictoires des gestionnaires. La revue de quelques stratégies, processus et types de gestion des villes a permis de faire plusieurs constats et limites des

domaines de gestion existantes : faible niveau de maturité numérique et technologique; manque de vision stratégique du développement durable; limites de la résolution de problèmes et apparition de nouveaux problèmes; gestion en vase clos; ampleur de la gestion des ressources humaines et de la gestion du changement; importance de gérer les données et d'en détenir la propriété.

Face aux enjeux d'aujourd'hui qui sont de plus en plus importants et d'une complexité de plus en plus forte, ils existent des solutions de plus en plus intelligentes qui aident à une meilleure prise de décision. Par exemple, la *blockchain*, le BIM, le SIG, la ville numérique, la ville intelligente et les modèles numériques 3D des villes. Ces solutions sont toutes basées sur les données et utilisent la technologie. D'où l'importance de revoir la littérature qui concerne toutes ces solutions intelligentes et comprendre comment exploiter ces bases de données déjà existantes pour concevoir celle de la ville.

La centralisation des données soulève certaines craintes sur leur contrôle, sécurité et propriété. Les institutions financières, par exemple, considère la sécurité des données et des transactions comme un enjeu majeur. Certaines utilisent la *blockchain* pour remédier aux problèmes de centralisation des données. C'est ainsi que le maillage de fonctionnement de la *blockchain* et de projet IOTA feront partie de la revue de la littérature sur les solutions déjà mises en œuvre. Le BIM et le GIS s'appuient sur une base de données structurée et interrogeable, mais le BIM est majoritairement utilisé pour les infrastructures verticales (ex. bâtiment) alors que le GIS est utilisé pour les infrastructures horizontales (ex. routes).

La ville numérique permet aux gens d'interagir et de partager des connaissances dans un espace numérique virtuel, mais l'idée d'améliorer la vie des citoyens n'est pas explicite selon Cocchia (2013).

La ville intelligente est une initiative politique basée sur la stratégie du développement durable et vise à améliorer la qualité de vie des citoyens. Cette stratégie coïncide avec celle recherchée dans cette étude. La ville intelligente prend en compte les quatre systèmes de la ville (la population, les instances gouvernementales/municipales, le territoire et les infrastructures), comme exigé dans cette étude. Mais, elle considère la gestion de chaque système séparément parce qu'elle est menée par des gestionnaires spécialisés, chacun dans son domaine d'expertise, ayant de multiples perceptions. La ville intelligente fait appel aux technologies, elle utilise différents systèmes d'aide à la décision, mais chaque système est dédié à un seul type de gestion. Toutefois, cette technologie ne structure pas et ne regroupe pas les réflexions individuelles des différents gestionnaires.

Le cerveau humain n'a pas la capacité de stocker une énorme base de données ni d'interroger les différents systèmes de la ville. C'est ainsi que les gestionnaires ont eu recours aux maquettes numériques 3D qui font ressortir les éléments convergents et divergents de compréhension de la complexité de la gestion des villes. Mais, la fonction de la plupart des maquettes existantes se limite à la visualisation ou à un type d'analyse bien précisé lors de la conception de la maquette.

À partir des systèmes de la ville et des enjeux, différents domaines de gestion se sont créés. La gestion des données est à leurs bases, notamment en ce qui a trait à la gestion des actifs, des eaux, du transport, des projets de construction, de la qualité de l'environnement, des déchets et des ressources humaines. Tout domaine de gestion résout une partie des problèmes de la ville. Cette dernière nécessite une vision holistique, globale et transdisciplinaire. La solution proposée pour résoudre les problèmes de gestion de la ville est fondée sur l'interconnexion entre les différents systèmes. La Figure 1 illustre la façon dont les systèmes sont gérés et propose leur interconnexion. La solution consiste en une gestion intégrée de l'ensemble des systèmes de la ville visant le développement durable et la résilience.

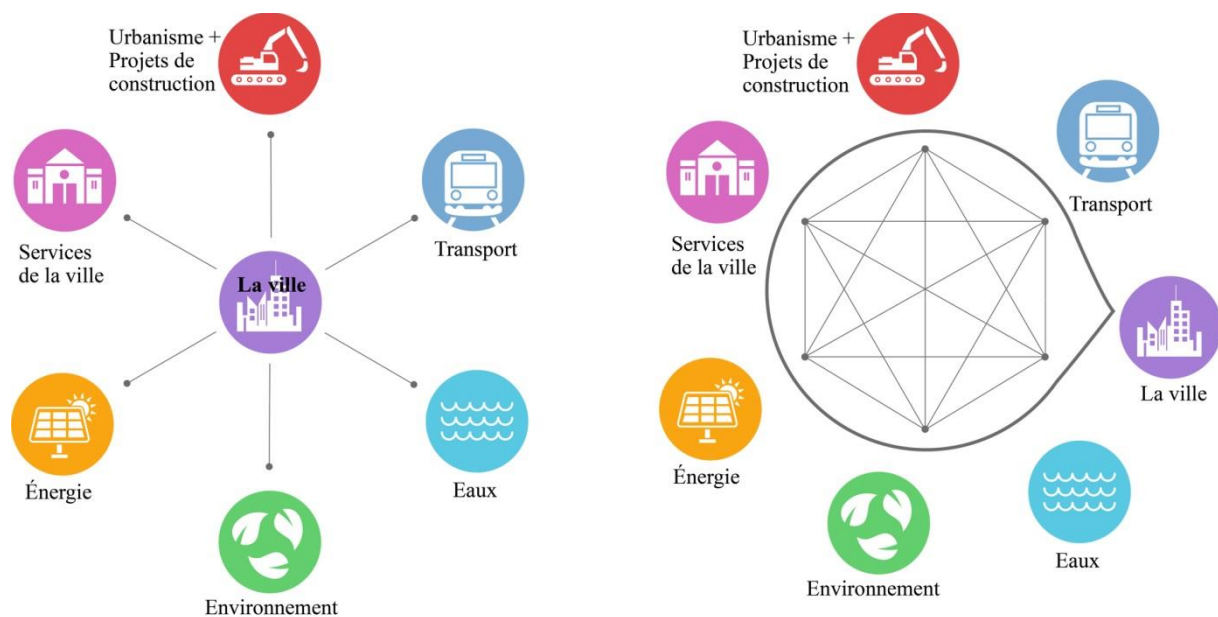


Figure 1 - Gestion actuelle des systèmes de la ville et proposition d'interconnexion

L'interconnexion entre les systèmes de la ville est possible grâce à la numérisation, et à l'intégration de la nouvelle technologie dans les différents domaines de gestion. Ceci est possible grâce une méga base de données interrogeable de toute la ville.

L'objectif futur de cette recherche est de développer un système d'aide à la décision, basé sur un modèle numérique 3D d'une ville. Vu l'ampleur du projet, l'objectif de cet article est la création du modèle 3D numérique de la ville, interrogeable, performant et unique par sa capacité d'interconnecter les systèmes de la ville, d'analyser les données en temps réel afin d'extraire les informations pertinentes pour une meilleure prise de décision.

L'article est une revue de la littérature, la méthodologie suivie se résume ainsi : la deuxième section est sur la gestion des données; l'interconnexion du territoire et des infrastructures en combinant le BIM au GIS (CIM); l'interconnexion des instances gouvernementales/municipales et du citoyen par le biais des villes numérique et intelligente. La troisième section analyse cinq modèles 3D numériques de ville; présente les constats et propose des tendances d'analyse pour le nouveau modèle. La section 4 discute les concepts des modèles existants ; explique la valeur ajoutée du modèle proposé ; et démontre sa robustesse.

2. ÉLÉMENTS CLÉS POUR CONCEVOIR UN MODÈLE 3D D'UNE VILLE

Le modèle numérique 3D de la ville est constitué de plusieurs bases de données liées. Parmi les systèmes de la ville : le territoire et les infrastructures. Ces deux systèmes ont été déjà pensés, chacun à part, comme une base de données pour leurs gestions. Il existe déjà des processus de modélisation et d'interrogation du modèle. Par exemple, le BIM pour les infrastructures et le GIS pour le territoire. Pour alimenter cette recherche et approfondir la réflexion sur les bases des données qui peuvent être combinées pour constituer la méga base de données du modèle, il était indispensable : de fouiller l'information sur les caractéristiques des données; d'identifier, dans ce qui existe, les éléments clés (BIM et GIS) et ce qui commence à émerger (blockchain et CIM).

Le modèle numérique 3D de la ville repose sur les données numérisées. Il sert à présenter des analyses et simulations pour une meilleure prise de décision. Ceci concerne les instances gouvernementales/municipales qui est le troisième système de la ville. C'est dans ce contexte que la recherche s'oriente vers la ville numérique car cette dernière repose sur la numérisation des données suite aux exigences du gouvernement. Aussi, la ville numérique est souvent confuse avec la ville intelligente, les deux utilisent la technologie. La ville intelligente prend en considération la qualité de vie des citoyens en plus des principes du développement durable. Elle s'intéresse à la population, quatrième système de la ville. Il sera donc judicieux d'approfondir la connaissance sur les deux villes numériques et intelligentes, comprendre en quoi consiste l'intelligence d'une ville et comprendre l'apport de la technologie pour la gestion des villes.

2.1. GESTION DES DONNÉES

À partir des données, la maquette numérique 3D de la ville sera modélisée et développée pour l'interroger en temps réel. Pour optimiser le temps de recherche et de collecte des données de qualité, il est important d'identifier le besoin en données pour la modélisation; de penser à la structure et au support dont les données vont être stockées; de trouver leurs bonnes sources; de sélectionner l'outil qui permet la collecte rapide et précise. La quantité de données d'une ville est énorme. Il faut savoir sélectionner la donnée pertinente et planifier sa gestion ainsi que son maintien en continu. La sécurité des données est aussi un enjeu important à réfléchir au préalable.

Cette section présente les connaissances de base sur les données, à savoir : les outils de collecte; l'analyse et la présentation des données ; le stockage ; l'importance d'être propriétaire des données ; la sécurité des données (la *Blockchain*, projet IOTA) et le contrat intelligent. Puisque le modèle 3D de la ville est fondé sur les données, ces connaissances de base sont le fondement du modèle aussi.

2.1.1 Données, informations et connaissances

Il est important de distinguer les notions données, information et connaissance. Les définir précisément n'est pas chose facile (Floridi, 2013). Par exemple, des images prises à 360° dans la conduite d'égout par une caméra sont des données. Une courbe donnant l'évolution de la déformation dans le temps est une information. Le fait que la conduite se déforme facilement

parce qu'elle est vieillissante est une connaissance. La Figure 2 montre le cheminement de la donnée vers le savoir.

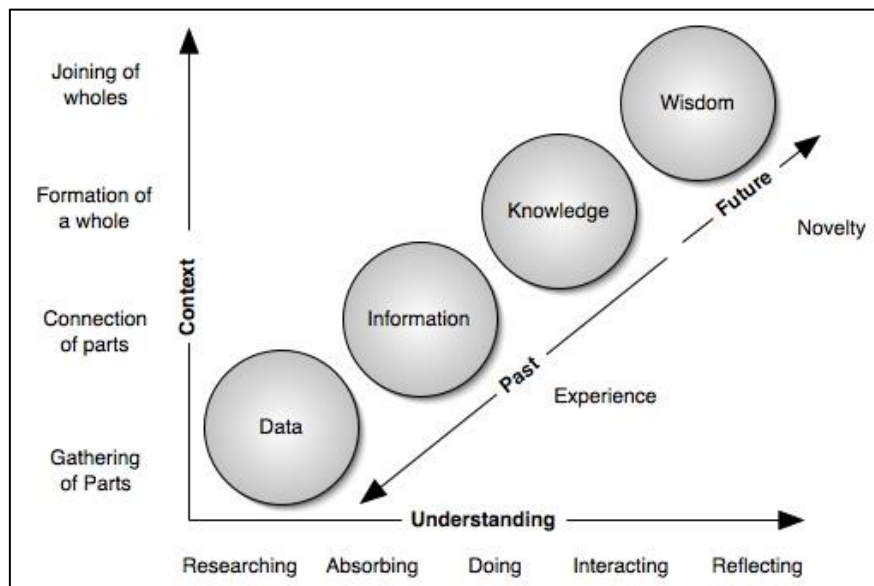


Figure 3 - De la donnée vers le savoir (la chaîne linéaire DIKW)

Clark (2004). Reproduite avec la permission de Clarck D

Selon Abiteboul (2012), les trois notions peuvent se résumer ainsi :

- La donnée est la description de la réalité (une observation, une mesure, etc.).
- L'information est le fruit de l'organisation et de la structure de la donnée.
- Les connaissances sont acquises selon la compréhension du sens de l'information.

Les données collectées sont brutes, elles n'aideront pas à la gestion de la ville « avec sagesse » si les informations ne sont pas extraites. Le modèle 3D de la ville à développer est constitué de plusieurs bases de données. Le modèle sera plus performant si sa fonction dépasse sa mission de stocker et structurer les données de la ville, si le modèle réussit à supporter l'analyse et la simulation des données et l'extraction des informations pertinentes pour la prise de décision.

2.1.2 Gestion des données pour la diffusion des informations

Les spécialistes de l'information et les scientifiques ont étudié en profondeur des systèmes informatiques complexes afin de collecter les données, extraire et analyser l'information puis transmettre la connaissance.

Caractéristiques des données

Les données sont de provenances multiples. Elles sont la base de la gestion des actifs, des transports, de l'énergie, de l'eau, de calcul de l'empreinte carbone, des objectifs sociaux et environnementaux. Énormément de données doivent être prises en considération pour tous les systèmes de la ville afin d'arriver à une meilleure prise de décision. Chaque donnée se caractérise par un format (nombre, texte, image), une catégorie (vectorielle, descriptive), la manière dont elle est collectée (méthodes d'investigation et d'auscultation, stratégies de relevés, données existantes), des paramètres d'évaluation (priorité, fiabilité/ désuétude, efforts de conversion), des coûts (mises à jour, mandats externes) et la métadonnée (origine, date, auteur). L'ensemble de ces caractéristiques contribue à définir la pertinence de la donnée.

D'où l'importance de préciser le besoin en données pour la conception du futur modèle 3D de la ville.

Outils de collecte, analyse et présentation des données





Plusieurs outils permettent une collecte rapide et de qualité des données : les caméras pour l'inspection télévisée des conduites (caméra HD 360°, SONAR, etc.); les nouveaux satellites qui permettent la prise d'imageries fiables et précises (résolution à 45 cm au sol, etc.); le système de navigation et de positionnement par satellite (GPS); les casques de visites en réalité virtuelle ou augmentée des projets en amont ou pendant la construction. Le Tableau 1 présente quelques outils de collecte de données.

Stockage

Grâce à la maîtrise des bases de l'algorithmique et de sa mécanique du raisonnement, un grand volume de stockage des données est maintenant possible. De plus, plusieurs supports de stockage, notamment les disques durs externes et la mémoire flash, sont non seulement disponibles, mais à la portée de tous et permettent un grand volume de stockage. Une évolution rapide est constatée pour ce qui est du matériel informatique; « les prix baissent, les vitesses d'accès ou de transfert croissent, les volumes augmentent » (Abiteboul, 2012).

Pour stocker la donnée, il est indispensable de comprendre ce qu'est le stockage, sa représentation, son organisation et l'endroit du stockage. Par exemple, la donnée peut être stockée dans des bases de données différentes comme le *cloud*. Le stockage des données dans le futur modèle 3D à développer est aussi un sujet à bien étudier.

Tableau 1 - Quelques outils de collecte de données

Nom	Caractéristiques	Photo de l'outil	Résultat
Avion	Imagerie aérospatiale - Résolution au sol de $\pm 3\text{cm}$ - Couverture de jour par beau temps - Coût d'acquisition élevé à moyen - Grande couverture des clichés		
Drone	Imagerie aéroportée - Résolution au sol de $\pm 3\text{cm}$ - Couverture de jour par beau temps - Très sensible au vent - Coût d'acquisition très faible - Couverture des clichés faible		
Station-total / Robot	Relevé station - Précision ponctuelle au sol de $\pm 3\text{cm}$ - Opérable en tout temps et tout lieu - Toutes conditions climatiques - Nécessité de traitement et mise en plan - Coût d'acquisition faible		
Scanner LIDAR	Imagerie HDR couleur / Maquette 3D en nuage de points avec des coordonnées polaires Précision ponctuelle au sol $\pm 3\text{cm}$ Toute condition climatique Coût d'acquisition moyen à élevé Méthode par balayage de points		
Références	(Blake, 2018), (Dionne, 2017), (Dnd, 2017), (Halama, 2017), (Leica Geosystems, 2018a, Reproduced with the permission of ©Leica Geosystems), (Leica Geosystems, 2018b, Reproduced with the permission of ©Leica Geosystems), (McGloin, 2015), (Rumble, 2018).		

2.2 Importance d'être propriétaire des données

Les données sont la base des décisions. Certaines entreprises utilisent les données personnelles de leurs clients pour développer leur marketing. Selon le Boston Consulting Group (BCG) (2012), le marché des données personnelles en Europe représentera une valeur économique de mille milliards d'euros en 2020. Mais la gestion des données fait face à des contraintes (la propriété de la donnée et son partage, etc.) qui nécessitent certaines décisions, d'où l'importance d'avoir le pouvoir de gérer les données, d'en être propriétaire.

L'obtention de l'information est maintenant réalisable grâce à l'interrogation des systèmes de gestion des bases de données, que cela soit un système relationnel ou un système d'information de la toile. La question qui se pose est la suivante : qui détient l'information?

Dans le cas du *Big Data*, il est difficile de rassembler, stocker et analyser un grand volume de données afin de diffuser l'information exacte. Cette difficulté a créé une compétition féroce « entre les fangs aux États-Unis (Facebook, Apple, Netflix, Google), les MTD en Chine (Baidu, Alibaba, Tencent), et les riches fortunes de 1000 entreprises multinationales » (Epstein, traduction libre, 2017).

C'est dans ce contexte que la centralité des données soulève certaines craintes chez les auteurs. Abiteboul (2012) doute de la confiance qu'il faut accorder aux moteurs de recherche en Europe, affirmant qu'« ils ont une puissance considérable de par leur contrôle de l'information ». Epstein (2017) attire l'attention sur les *fangs*, MTD et les 1000 entreprises citées plus haut. Ils sont les seuls à avoir la portée et la capacité d'obtenir plus de données, de les stocker et de les analyser afin de les transmettre. Neuer (2018) partage cette crainte : « ceux qui détiennent les données possèdent le pouvoir ». Dans ce contexte, d'autres questions se posent sur la sécurité (données manipulées ou volées), la possibilité d'erreur des algorithmes, la quantité croissante des données, le droit de propriété et le droit de la personnalité. C'est pour ces raisons qu'il y a actuellement des débats et des projets de lois sur la protection des données personnelles, par exemple, le scandale Facebook-Cambridge Analytica et l'entrée en vigueur du règlement général sur la protection des données (RGPD) de l'Union européenne. Être propriétaire et gestionnaire des données permet à certains égards de garder le contrôle sur les traces laissées dans l'environnement numérique. Être propriétaire et gestionnaire des données du futur modèle 3D de la ville est un sujet très important à prendre en considération.

2.3 Blockchain, projet IOTA et contrat intelligent

Pour remédier au problème de centralité des données, quelques solutions sont déjà mises en œuvre. Un premier exemple est la *blockchain*. Elle est apparue en 2008 avec la monnaie numérique bitcoin et est restée presque inconnue jusqu'en 2015 (Kinnaird, Geipel, & MBE, 2017). Aujourd'hui, l'utilisation de la *blockchain* est étendue à d'autres domaines (*Blockchain France*, s-date). C'est une solution pour décentraliser et sécuriser les données avec transparence, une « [b]ase de données distribuée et sécurisée, dans laquelle sont stockées chronologiquement, sous forme de blocs liés les uns aux autres, les transactions successives effectuées entre ses utilisateurs depuis sa création » (OQLF, 2017). La particularité de la *blockchain* comparée aux autres bases de données est qu'il n'y a pas « d'autorité centrale. Il n'y a pas d'intermédiaire », telle une banque pour transférer l'argent ou un avocat pour confirmer les conditions d'un contrat (Koutsogiannis & Berntsen, traduction libre, 2017). La Figure 3 illustre le principe de la *blockchain*.

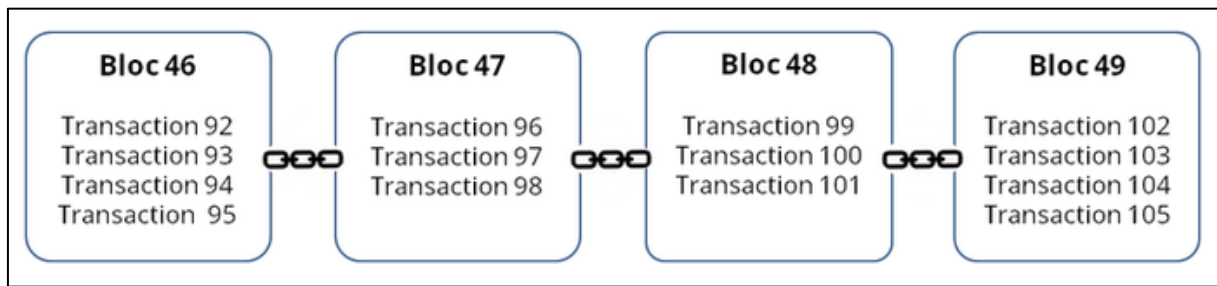


Figure 4 - Représentation du principe de la blockchain
Blockchain France (s-date), reproduite avec permission de Blockchain France

Un deuxième exemple est le projet IOTA, qui propose l'interaction à grande échelle entre les appareils intelligents. La Figure 4 représente le maillage de son fonctionnement, il est comparable aux systèmes *blockchain* pour décentraliser et sécuriser.

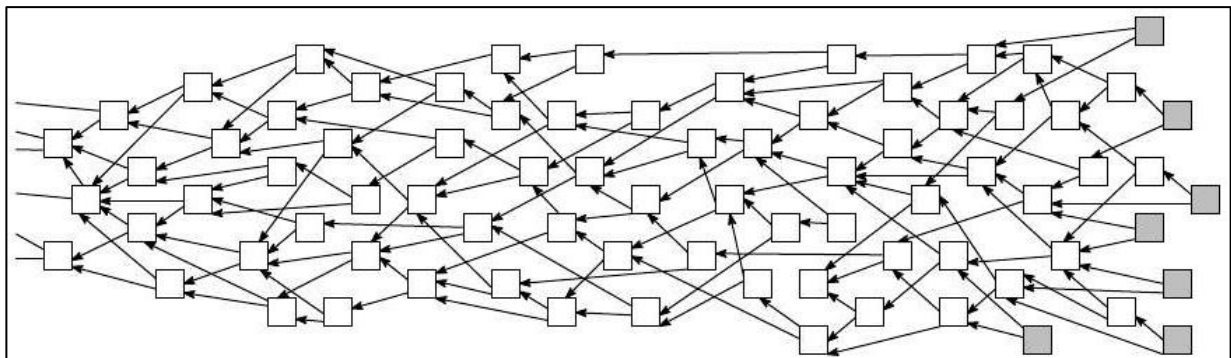


Figure 5 – Représentation du principe d'IOTA
Adaptée de Wikimedia Commons (2017)

Dans le domaine de la construction, selon Koutsogiannis et Berntsen (2017), la *blockchain* pourrait permettre une meilleure transparence et responsabilisation avec un meilleur contrôle du projet en général tout en améliorant les flux de travail et en minimisant les conflits et les risques. Par conséquent, grâce à la *blockchain*, la source des données est connue, la propriété est aussi définie. La *blockchain* pourrait permettre un processus de prise de décision plus rapide et plus basé sur les données, comme cela est déjà fait par l'utilisation de logiciels de construction. Mais 95 % des données de l'industrie de la construction ne sont pas numérisées (Koutsogiannis, 2017). L'exemple du contrat intelligent prouve la capacité de la *blockchain* à « ajouter plus de transparence à chaque type d'accord et de transaction dans un projet de construction » (Koutsogiannis & Berntsen, traduction libre, 2017). Le contrat intelligent est un protocole numérique basé sur un processus contrôlé et la *blockchain* pour des transactions plus directes sans besoin d'intermédiaire (p. ex. l'avocat).

La structure des données et le flux des informations du modèles 3D de la ville à développer peuvent s'inspirer de la *blockchain* et/ou du principe d'IOTA. Le processus est contrôlé, la source des données est connue et la propriété est bien définie.

3. DE LA NUMÉRISATION DES DONNÉES À LA VILLE INTELLIGENTE BASÉE SUR LA VILLE NUMÉRIQUE

3.1 INTERCONNECTER LE TERRITOIRE AUX INFRASTRUCTURES (deux systèmes de la ville)

La revue de la littérature a retrouvé quelques solutions possibles pour modéliser la ville en interconnectant ses deux systèmes le territoire et les infrastructures : la combinaison BIM et SIG, l'utilisation du BIM pour les infrastructures, le CIM ainsi que le BIM et la *blockchain*.

3.1.1 BIM, SIG et CIM

La gestion des infrastructures horizontales repose sur les données collectées au moyen de la géomatique, à savoir le traitement automatique de l'information géographique. Le modèle actuel de la ville numérique est un modèle d'information numérique urbaine qui repose sur les données géospatiales des infrastructures au moyen de la technologie SIG (Système d'information géographique).

Les problèmes de la gestion des projets de constructions verticales ne peuvent pas être résolus au moyen des données bidimensionnelles inscrites sur les plans. C'est ainsi que le processus BIM (*Building Information Modeling*) est adopté dans certains pays suite aux exigences gouvernementales/municipales.

La combinaison entre le SIG et le BIM peut résoudre le problème de gestion de l'ensemble des infrastructures (horizontales et verticales). Le BIM utilisé pour la gestion des infrastructures urbaines est souvent appelé « CIM » (McGraw-Hill, 2012) ou « BIM pour les travaux de génie civil ».

Hutsel et Bush (2016) confirment que la conjonction de BIM, SIG et CIM est en train de se concrétiser. Leur intégration et leur interopérabilité sont rendues possibles grâce à des normes et de meilleures pratiques. S'élabore ainsi un langage qui peut être inclus dans tous les contrats pour créer un lien géospatial. Afin de gérer plusieurs sources de données, appelée maquette 3D de ville, l'application des différentes sources de données en temps réel tout au long du cycle de vie du projet et leur disponibilité sont nécessaires. De plus, un référentiel géospatial doit être créé pour la prise en charge du cycle de vie géospatial.

3.1.2 BIM pour les infrastructures

Les instances gouvernementales/municipales ont de fortes attentes en matière de rentabilité et de respect des délais. Il est estimé que d'ici 2025, la numérisation à grande échelle de l'environnement bâti entraînera des économies de 13 à 21 % au cours des phases de conception d'ingénierie et de construction, et de 10 à 17 % durant l'exploitation de l'ouvrage (Boston Consulting Group, 2016). L'industrie 4.0 est la quatrième révolution industrielle qui voit les technologies numériques s'intégrer au cœur des processus industriels. (McKinsey Global industrie, 2017).

Le BIM s'inscrit dans cette révolution. Selon Teo Ai Lin (2017), il améliore les délais, la qualité, la productivité, la performance et la compétitivité. Il offre une source d'informations fédérées et réutilisables grâce au modèle 3D. Le BIM peut générer d'énormes avantages relatifs à la gestion de projets de construction, favorisant ainsi l'amélioration de la prise de décisions. Gould (2010) propose que le BIM soit principalement orienté vers la gestion, en combinant les aspects sociaux et technologiques de projets de construction. Le BIM permet de tester, d'analyser et de simuler en temps réel afin d'atteindre une meilleure efficacité énergétique ainsi qu'une meilleure gestion des coûts avant même la construction. Il entraîne

aussi une réduction des déchets et des aménagements (Azhar & al, 2008; Bentley, 2018; BIMhub, 2018). Il est un processus qui fonctionne pendant tout le cycle de vie d'un actif (Howard & Björk, 2008; Rezgui, Beach & Rana, 2013).

Le BIM est majoritairement utilisé pour la gestion des constructions verticales. Quelques auteurs sont d'avis que le BIM trouve de nouveaux domaines d'application pour lesquels il n'a pas été conçu à l'origine, tels que celui des projets d'infrastructures (Bradley, Li, Lark, et Dunn, 2016). Il est constaté des débuts d'intégration du BIM aux projets d'infrastructures (autres que les bâtiments) dont pour la construction du métro de Doha (2022), du pont de l'Atlantique (Colon, Panama) (2018) et du réseau ferroviaire de type express régional (RER) Crossrail au Royaume-Uni (août 2018).

Le BIM peut apporter énormément de bénéfices aux différents systèmes de la ville, dont la gestion des projets de construction et la gestion des actifs. Quelques applications sont ici examinées.

- Gestion des routes

Le système de circulation dans la ville peut être géré à l'aide d'un modèle d'information (BIM en conjonction avec le GIS) sur la circulation urbaine qui permet la gestion du trafic. Le modèle 3D d'une route offre de nombreux avantages, par exemple la simulation pour le drainage lors de la conception. Ce modèle permet aussi de déterminer si les limites de vitesse devraient être ajustées pour fluidifier la circulation et les niveaux de congestion peuvent être surveillés et analysés. Grâce à la signalisation d'avertissements, les automobilistes peuvent également être alertés des dangers de la route et des embouteillages.

Highways England a adopté le programme Smart Motorways basé sur la modélisation pour non seulement résoudre le problème de congestion, mais aussi pour améliorer la sécurité (SmartMarket, 2017). Ce programme vise la gestion des données d'actifs. Les concepteurs utilisent les outils de réalité virtuelle (VR) pour informer les entrepreneurs et même pour guider les engins sur chantier. Ils envisagent aussi d'utiliser la robotique pour creuser les tranchées.

- Gestion des eaux

Les villes comportent des plans d'eau (rivières, mer, etc.) et le cycle de l'eau en milieu urbain est de plus en plus vulnérable aux changements climatiques. Elles possèdent des systèmes de gestion des eaux usées et d'alimentation en eau potable.

Les eaux usées désignent aussi bien les eaux sanitaires d'origine domestique, industrielle et institutionnelle que les eaux de ruissellement en milieu urbain. L'eau est indispensable pour notre vie, mais sa pollution a d'énormes répercussions sur la santé des citoyens. Ainsi, le débit de ruissellement en temps de pluie peut atteindre, voire dépasser, cent (100) fois le débit par temps sec; le surplus du mélange est déversé sans traitement dans le milieu récepteur (rivière, fleuve, lac, mer, etc.). Il est donc nécessaire de savoir tirer profit de la modélisation dans la conception et l'évaluation du comportement des infrastructures de drainage, que cela soit pour une nouvelle conception ou pour la réhabilitation des ouvrages de drainage urbain.

3.1.3 BIM et *blockchain*

L'utilisation d'un modèle BIM signifie le partage des données entre plusieurs intervenants (architectes, ingénieurs, etc.) sur le nuage (*cloud*) au moyen de *Common Data Environment*

(CDE). De ce fait, le modèle est vulnérable au piratage et à la manipulation des données, qui sont centralisées.

Selon le rapport d'Arup (2017), la *blockchain* est la solution, pendant la conception et la construction. Elle enregistre chaque intervention sur le modèle sans possibilité de changement ou de suppression, ce qui augmente la confiance entre les intervenants. Grâce à cette transparence des données, elle aide l'intervenant à prouver sa propriété intellectuelle, elle permet le partage des composants numériques sans possibilité de modification, par exemple les familles dans Revit. Après la livraison du projet, la *blockchain* offre la possibilité de lier le numérique au physique. Ainsi, l'ajout d'une puce à un matériau connecté à Internet permettrait de transmettre des données réelles, ce qui faciliterait le suivi tout au long du cycle de vie du projet. Et la puce aiderait à connaître toutes les caractéristiques des matériaux, y compris l'emplacement de ceux à recycler (économie circulaire).

3.1.4 Politique d'adoption du BIM et compétitivité

Face à l'avenir concurrentiel du marché mondial de la construction, les pays où le BIM n'est pas encore adopté risquent de perdre des occasions d'affaires offertes par le BIM sur de grands marchés de construction, que ce soit sur leur propre territoire ou à l'étranger. Le désir de faire progresser l'innovation et de devenir un leader de l'industrie est au cœur des politiques BIM du Royaume-Uni et de Singapour. Une partie de la stratégie de construction globale du Royaume-Uni est de conduire un secteur de la construction compétitif, efficace, productif et capable d'exporter des services de conception et d'ingénierie vers d'autres parties du monde. Le BIM fait partie de l'ensemble des compétences requises. (Eadie, Odeyinka, Browne, McKeown & Yohanis, 2014).

Singapour, l'un des pionniers mondiaux du BIM, a souvent importé des services de conception et de construction pour répondre à la demande croissante et tirer parti des méthodes et outils les plus efficaces. Selon Teo Ai Lin (2017), la priorité de la stratégie de Singapour est la croissance économique. Son mandat et sa feuille de route BIM visent à inverser la tendance afin que les entreprises basées à Singapour puissent gagner en concurrence avec les entreprises internationales, ce qui permettra de soutenir les emplois et les revenus de l'industrie locale (Bosquet, 2017).

Il est donc primordial que les instances gouvernementales/municipales exigent l'adoption du BIM dans leur territoire. Le futur modèle 3D interrogeable de la ville bénéficiera donc des modèles BIM déjà existants des infrastructures. L'interopérabilité entre le BIM et le GIS permettra de gérer une source unique de données, la maquette 3D de la ville.

3.2 INTERCONNECTER LES INSTANCES GOUVERNEMENTALES/MUNICIPALES AUX CITOYENS (deux systèmes de la ville)

La situation visée par cette recherche est d'augmenter l'efficacité des gestionnaires afin de prendre des décisions mieux éclairées pour la pérennité des infrastructures et pour offrir le meilleur service aux citoyens d'aujourd'hui et de demain. Le résultat escompté est d'avoir une ville saine durable et résiliente au moyen de la technologie. Cette vision se superpose avec la combinaison de deux visions, celle de la ville numérique et la ville intelligente.

Est-ce que le modèle 3D de la ville interrogeable sera plus performant et facilement développé, du fait que la ville soit numérique et/ou intelligente ? Il est donc important

d'approfondir les connaissances sur ces deux concepts déjà existants afin de mieux proposer les solutions futures.

Les auteurs ne divergent pas seulement dans leur manière de nommer la ville intelligente (p. ex. *cyberville*, ville numérique, ville verte, etc.), mais diffèrent aussi dans leur manière de la conceptualiser selon le contexte. S'ajoute à cela, la confusion entre ville numérique et intelligente. Cette section définit la ville numérique et la ville intelligente, explique leurs différences et similitudes et attire l'attention sur les éléments qui interconnectent quelques systèmes de la ville dans ces deux concepts.

3.2.1 Ville numérique (*digitale city*)

Cet article présente trois définitions de la ville numérique. Celles-ci diffèrent dans leur formulation, mais se rejoignent sur le sens. Pour Qi et Shaofu (2001), la ville numérique est « un système adaptatif basé sur le réseau informatique et les ressources de l'information urbaine, qui forment un espace numérique virtuel pour la ville. Il crée un marché de service de l'information et un centre de déploiement de ressources de l'information ». Schiewe & al (2008) et Dykes (2010) définissent la ville numérique comme une approche fonctionnelle qui se résume en quatre actions : 1) soutenir les données de la ville en format numérique; 2) mettre à disposition une infrastructure de communication (physique ou virtuelle); 3) analyser et traiter les données afin d'extraire les informations pertinentes; 4) utiliser un environnement virtuel dans la planification et l'analyse pour la prise de décision. La définition la plus célèbre est celle d'Ishida dans son étude *Kyoto Digital City*, dont le but était de limiter l'émission du CO₂. Il définit la ville numérique comme « une arène dans laquelle les gens peuvent interagir et partager les connaissances, les expériences et les intérêts mutuels » (Sorrentino et Simonetta, 2013).

Plusieurs éléments, objets de cette recherche, sont présents dans ces définitions. Le sujet de la prise de décision dans la ville, qui repose sur la numérisation et l'analyse des données, revient dans ces définitions. La limitation de l'émission du CO₂ fait partie de la vision de la recherche sur le développement durable. Ishida explique que la ville numérique est un espace collaboratif virtuel entre les gens (Sorrentino et Simonetta, 2013). Cette définition rappelle le modèle 3D que cette recherche souhaite développer.

3.2.2 Ville intelligente (*Smart City*)

Plusieurs définitions de la ville intelligente existent, mais aucune n'est universellement reconnue (Cocchia, 2013). Ces définitions ne sont pas en contradiction les unes avec les autres et elles révèlent des caractéristiques partagées (Dameri, 2013). Cet article présente trois définitions afin d'atteindre une compréhension globale et complète.

Northstream (2010) explique que la ville intelligente est celle où les services publics sont fournis aux citoyens « d'une manière transparente » par l'utilisation de technologies omniprésentes afin d'améliorer la qualité de vie dans un environnement urbain. Pour Hall (2000), elle est « une ville qui surveille et intègre les conditions de tous ses aspects critiques des infrastructures, y compris les routes, les ponts, les tunnels, les rails, les métros, les aéroports, les ports maritimes, les communications, l'eau, l'énergie, et les bâtiments; optimise ses ressources; planifie ses activités de maintenance préventive; et surveille les aspects de sécurité tout en maximisant les services aux citoyens ». Setis (2012) considère la ville intelligente comme celle qui « peut combiner des technologies aussi diverses comme le

recyclage de l'eau, les réseaux énergétiques avancés et les communications mobiles afin de réduire l'impact sur l'environnement et d'offrir une meilleure vie à ses citoyens ».

Le premier point qui attire l'attention dans ces définitions est que la ville intelligente s'intéresse à la qualité de vie des citoyens. Ce sujet n'a pas été abordé dans les autres processus ou concepts présentés dans cet article. L'optimisation des ressources et le principe du développement durable sont aussi présents. L'utilisation de la technologie dans les différents types de gestion est encouragée comme cette recherche l'exige.

3.2.3 Différences et similitudes entre ville numérique et ville intelligente

Selon Cocchia (2013), les principales différences entre la ville numérique et la ville intelligente concernent leurs contenus, natures et relations. La ville numérique est une tendance libre émergente suite à la fourniture des services numériques par les instances gouvernementales/municipales alors que la ville intelligente est une tendance politique pour améliorer la qualité de l'environnement dans la ville. En d'autres termes, elles sont différentes à la fois dans leurs objectifs, stratégies et projets à mettre en œuvre. À la base des définitions de la ville numérique est l'idée de collecter les données en utilisant les technologies de l'information et de la communication (TIC). Le rôle des citoyens est moins proactif et l'idée d'améliorer la qualité de vie des citoyens n'est pas explicite (Cocchia, 2013). Au contraire, l'évaluation des villes intelligentes repose sur des indicateurs physiques tels que les émissions de CO₂, les gaz à effet de serre, les tonnes de déchets, les mégawatts produits à partir des sources renouvelables (Al-Hader & Rodzi., 2009). Par conséquent, le cœur de la ville intelligente est la stratégie de développement durable et l'utilisation de ses propres ressources naturelles pour améliorer la qualité de vie des citoyens d'aujourd'hui et de demain.

Malgré les différences, le concept de ville intelligente chevauche souvent celui de ville numérique (Yuan & al., 2012 ; Lombardi & al., 2012). Ce chevauchement tient au fait que les deux villes utilisent la technologie, spécifiquement les TIC, pour améliorer le développement économique de la ville. Par exemple, l'entreprise IBM affirme que le fonctionnement de la ville repose sur trois systèmes : 1) la planification et la gestion des services; 2) les services d'infrastructures et 3) les services humains. Puis, chacun des systèmes forme un système individuel, la ville étant un système de systèmes (Söderström & al., 2014). C'est dans ce contexte qu'IBM a commencé à fournir aux instances gouvernementales/municipales des solutions intelligentes axées sur les communications, l'énergie et les services publics, les soins de santé, l'assurance, la vente au détail, le transport, etc. (Cocchia, 2014). Par conséquent, la ville intelligente conçue par IBM est aussi numérique.

Les différents objectifs de la ville intelligente cités dans cette section coïncident avec les objectifs de cette recherche. L'interconnexion entre les instances gouvernementales/municipales, les citoyens et les infrastructures sont fortement présents ici. La vision de cette recherche est identique à celle de la ville intelligente. Le modèle 3D à développer pour la ville est un modèle 3D d'une ville intelligente tout court.

4. CRÉATION D'UN NOUVEAU MODÈLE 3D DE LA VILLE

Suite à la précédente section sur les éléments clés de conception du modèles 3D de la ville, soit les différents processus et solutions existantes, la suite de l'article étudie des modèles 3D de villes existantes et propose un nouveau modèle à partir de la revue de la littérature.

La visualisation et le stockage des données sont des caractéristiques des modèles de villes 3D riches en informations, qui peuvent être largement appliquées à l'urbanisme, la prise de décision et la gestion des espaces urbains (Koeninger et Bartel 1998; Lee et Kwan 2005; Ross & al. 2009; Qing & al. 2009). De plus en plus de villes sont modélisées en 3D (Mao & al., 2014). Plusieurs villes telles qu'Abu Dhabi ont eu recours au modèle 3D et plusieurs entreprises (par exemple Google) ont également intégré des modèles 3D de ville dans leurs services. Ces modèles sont conçus de multiples manières et sont utilisés pour différents objectifs, à savoir pour la visualisation et la planification urbaine, mais aussi pour la gestion des bruits, la gestion des eaux, etc.

4.1 Description de cinq modèles 3D de villes

Cinq modèles 3D de villes sont sélectionnés et analysés. Ces modèles ont été choisis en fonction de différents critères, soit: différents pays et dates; différents propriétaires et objectifs derrière leur création; différentes techniques et technologies utilisées.

Modèle 3D de la ville de Hong Kong : La ville de Hong Kong rencontre des problèmes de bruit provenant de la circulation routière. Sa densité des véhicules est d'environ 283/km en 2009 (Information Services Department, 2009). Elle est la ville la plus dense en population au monde avec plusieurs immeubles résidentiels de 40 à 60 étages. Les façades des immeubles sont exposées au bruit. Pour réduire ce bruit, la ville a conçu une carte des contours de bruit au moyen du GIS pour compiler les informations sur le bruit, quantifier l'ampleur du bruit et évaluer les mesures d'atténuation du bruit. Les informations présentées en 2D dans la carte étaient limitées, car elles n'indiquent pas la variation verticale des niveaux de bruit. C'est ainsi que la ville a eu recours à l'utilisation du modèle de bruit de visualisation 3D interactive. Le modèle a permis de communiquer les résultats de bruit aux utilisateurs (les professionnels et le public) pour une bonne compréhension et surtout pour améliorer la situation.

3D de onze villes en France

Le projet d'acquisition d'une maquette numérique 3D réaliste a été lancé en 2004 et a duré plus de huit ans. Les modèles 3D sont chargés dans un rayon restreint, les bâtiments éloignés de la caméra n'apparaissent pas afin de conserver une fluidité d'utilisation. Ce qui fait la différence entre ce modèle et le modèle de Google earth est la précision faible de ce dernier. Le niveau de détail du modèle est disponible en LOD1 et LOD2.

Selon Pages jaunes (2007), le modèle a été utile dans le cadre de simulations diverses. Suite à cette expérience, la ville a décidé de lancer une nouvelle génération de maquette 3D plus précise.

3D ville de Chennai en Inde

En 2008, la ville de Chennai a connu un développement considérable qui dépasse la planification temporelle et spatiale. Les urbanistes étaient sous pression quotidienne. Pour soulever les défis, ils utilisaient différents outils de modélisation, par exemple, ceux de la conception assistée par ordinateur CAO et le SIG. Ils ont créé un modèle pour les aider à une meilleure prise de décision. Ce modèle a été généré depuis ArcMap vers ArcScene, les deux sont des outils d'ESRI. L'objectif de la modélisation 3D est de mesurer l'impact de l'urbanisation sur les infrastructures existantes, précisément la capacité des égouts à supporter un volume supplémentaire des eaux usées, pour une meilleure planification.

Cette expérience a conclu que « les analyses doivent être effectuées de manière holistique » et qu'il faut intégrer tous les paramètres d'infrastructures physique et sociale en plus de la réglementation de zonage selon Ahmed & Sekar (2015).

3D ville de Londres en Angleterre

Une surface de 25 km² du centre de Londres a été modélisée en 3D. Le modèle 3D de base est capturé manuellement à l'aide de la photogrammétrie stéréo. La photographie source et les données associées proviennent des dernières images GSD haute résolution de 12,5 cm collectées en août 2016. La modélisation des infrastructures verticales est précise à 90 cm dans tous les axes. Le terrain dans le modèle 3D de base n'est pas plat. Il est capturé manuellement en utilisant la même méthode de photogrammétrie que les bâtiments et est précis à 20 cm dans tous les axes au niveau de la bordure. Le modèle est facile à utiliser et à mettre à niveau. Les fichiers sont structurés en mosaïques OS de 500 x 500 m (0,25 km²), ce qui permet de modifier ou remplacer facilement par zones sans charger le modèle entier. L'objectif de la modélisation 3D est commercial. L'entreprise privée AccuCities est fournisseur de données, elle modélise puis vend le modèle aux clients. Ces derniers sont des planificateurs, des développeurs et des architectes.

3D ville d'Abu Dhabi aux Émirats arabes unis

En 2018, l'entreprise Indienne Rolta basée à Mubai, qui a déjà travaillé à Dubai et à Oman, a obtenu le contrat de développement du modèle 3D de la ville d'Abu Dhabi.

Le modèle est d'une précision élevée, les façades des bâtiments sont effectuées en photo-réaliste. Cette recherche n'a malheureusement pas plus de détails sur les techniques et technologies utilisées. L'objectif principal de la modélisation est de partager la base de données interne avec d'autres organismes gouvernementaux/municipaux pertinents. Le modèle permet de gérer les services et aide pour une planification urbaine rapide de la ville. Il facilite les interventions d'urgence et améliore la sécurité publique.

Le Tableau 2 résume les différentes approches utilisées pour concevoir les différents modèles 3D des villes choisies. Seules les données disponibles sont détaillées.

Tableau 2 - Différentes approches pour concevoir des modèles 3D des villes

Le modèle	3D ville de Hong Kong en Chine	3D de onze villes en France	3D ville de Chennai en Inde	3D ville de Londres en Angleterre	3D ville d'Abu Dhabi aux Émirats arabes unis
Superficie modélisée	2700 km ²	11 villes	60 m ²	25 km ²	Plus de 5866 km ²
Début de la modélisation	2002	2004	2008	2016	2018 (en cours)
Concepteur	Ville de Hong Kong (Public)	Pages Jaunes (Privé)	Autorité de développement de la métropole de Chennai (Public)	AccuCities (Privé)	Ville d'Abu Dhabi (Public)
Objectifs poursuivis / stratégies	<ul style="list-style-type: none"> - Réduire le bruit du trafic routier de la ville de Hong Kong. Les routes se situent à proximité des gratte-ciel, ce qui a une incidence sur la variation verticale des niveaux de bruit. Cette situation rend imprécises les cartographies 2D de bruit existantes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Visualiser. - Offrir des vues avec une représentation volumétrique tridimensionnelle des bâtiments et de la végétation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Visualiser et améliorer la planification urbaine. - Récupérer toutes les données nécessaires pour la prise de décisions : pour l'analyse volumétrique et d'autres analyses environnementales. Par exemple, le modèle a été utilisé pour vérifier si la densification du centre urbain convient à la capacité des infrastructures existantes ou nécessite son développement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fournir et vendre le modèle aux clients payeurs qui sont des planificateurs, des développeurs et des architectes. - AccuCities construit des applications pour ses clients qui en construisent d'autres (p. ex. GVA). 	<ul style="list-style-type: none"> - Gérer les services et permettre un développement urbain rapide de la ville. - Faciliter les interventions d'urgence et améliorer la sécurité publique. - Partager la base de données interne avec d'autres organismes gouvernementaux/municipaux pertinents.
Techniques technologies utilisées	<ul style="list-style-type: none"> - Intégration de la modélisation de bruit, le SIG et d'autres outils pour représenter l'environnement sonore réel. - Utilisation de cartographies 2D de bruit et des outils de présentation 3D. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de Standard CityGML et de !!:mônnt_photographies de faible résolution. - Traitement des façades par le placage des textures photographiques de faible résolution. - Représentations comparables à celles de Google Earth / Google Maps 	<ul style="list-style-type: none"> - Grâce à des vérifications sur terrain, une carte retracée sur ArcGIS et extrusion du tracé sur ArcScene. - Modélisation réalisée à partir de la création de base 2D et le recours à l'imagerie Google pour déterminer le nombre d'étages. - Ajout de toutes les données spatiales et non spatiales en tant qu'attributs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilisation de fichiers Autocad solides .DWG, SketchUp .SKP et .FBX pour faciliter l'édition. - Capture manuelle à partir de l'enquête aérienne 2016. - 90 cm de précision - Impression 3D prête - Version Unreal Engine 4 incluse 	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement des surfaces extérieures des bâtiments effectué en photo-réaliste puis de l'intérieur des bâtiments. - Plusieurs points de repère modélisés avec une précision élevée.
Références	(Law, Lee, Lui, Yeung, & Lam, 2011)	(Pages jaunes, 2007)	(Ahmed & Sekar, 2015)	(AccuCities, 2018) (GVA, 2018)	(Zaman, 2018) (Municipalité d'Abu Dhabi, 2018)

4.2 Analyses, constats et propositions

L'analyse des cinq modèles 3D de villes a permis de faire plusieurs constats. L'idée de modélisation 3D de la ville n'est pas nouvelle. En 2002, la ville de Hong Kong l'a utilisée pour aider les gestionnaires à la prise de décision. Pendant cette période et bien avant, les gestionnaires ont compris les limites de gestion sur une base de données en 2D. Ils avaient bien compris aussi que la modélisation 3D ne servait pas juste à la visualisation, mais bien au-delà.

L'idée de modéliser la ville de Londres par zone aide énormément à supporter un plus grand nombre de données. Elle aide à modifier et mettre à jour le modèle. Mais cette idée doit être approfondie si le modèle sert à analyser et simuler des réseaux qui dépassent la limite de la zone. AccuCities vend le modèle 3D de Londres et les clients peuvent bonifier et améliorer le modèle selon leurs besoins. Pouvoir ajuster le modèle aux besoins est aussi une excellente idée. Mais collecter les données, modéliser et vendre le modèle est une initiative qui pousse la réflexion sur la propriété des données, sujet déjà abordé à la section 2.1.3. Certaines entreprises privées s'approprient les données de la ville pour les vendre, par la suite, à la ville même.

Plusieurs modèles 3D de villes existent, mais la modélisation est réalisée de différentes manières en fonction de la stratégie du propriétaire du modèle et de ses objectifs. Parfois, des entreprises privées, qui souhaitent vendre le modèle aux planificateurs, aux développeurs, etc. (modèles de Londres et de villes françaises) sont à l'initiative de la conception pour des stratégies commerciales et, d'autres fois, le gouvernement local est derrière le modèle et le considère comme outil d'aide à la décision. Par conséquent, il est constaté un manque de vision globale, ce qui empêche de voir tout le potentiel du modèle 3D de la ville.

Même si le modèle effectue une analyse pour un objectif bien défini, aucun modèle 3D de ville identifié pendant la recherche n'est interrogeable dans plusieurs secteurs. Les modèles existants ne produisent pas un tableau de bord pour aider les gestionnaires à piloter la ville en s'appuyant sur des indicateurs de performance en temps réel et avec une vision globale.

La structure du modèle 3D de la ville et le choix des techniques à utiliser dépendent des objectifs limités de conception. Cette structure limite à son tour le potentiel du modèle. Parce que les techniques utilisées se limitent à la visualisation et à quelques analyses, les modèles n'ont pas la capacité d'interconnecter tous les systèmes de la ville et d'effectuer plusieurs analyses (p. ex. le niveau d'émission de carbone, la gestion des catastrophes, etc.).

4.3 Bases de création d'un modèle 3D interrogeable d'une ville intelligente

Les outils de modélisation 3D, d'analyse et de simulation sont devenus plus sophistiqués et les modèles les plus récents présentent une précision plus élevée. Ceci prouve la section 2.1.2 qui explique la disponibilité des outils facilitant la modélisation à grand échelle.

La solution proposée par cette étude pour résoudre les problèmes de gestion de la ville et prévoir l'impact des décisions à prendre est un nouveau type de modèle 3D de la ville. C'est un modèle numérique paramétrique 3D (ou modèle virtuel 3D) de toutes les infrastructures de la ville. Il permet de visionner et présenter en réalité virtuelle et en réalité augmentée et mixte. Il permet aussi d'assurer le contrôle du respect des normes, la coordination et la simulation ainsi que la gestion des délais, des coûts sur tout le cycle de vie des actifs.

4.3.1 Avantages et spécificité du modèle proposé

L'objectif du modèle proposé est l'aide à la gestion intégrée de tous les systèmes de la ville. Il répond à toutes les utilités des modèles cités à la Section 3.1.1 (Visualisation, amélioration de la planification urbaine, analyse de bruit, etc.) et aux objectifs suivants : la gestion des actifs; la gestion des transports; la gestion des projets de construction; la gestion de la qualité de l'environnement; la gestion des eaux; la gestion et la récupération des déchets; etc.

Modèle qui interconnecte tous les systèmes

Aucun système ne fonctionne isolément. Le modèle proposé exige l'interconnexion entre les systèmes. Cet article présente une revue de la littérature de différentes solutions existantes.

La gestion des villes nécessite la gestion des infrastructures, c'est-à-dire la gestion de toutes les données qui contribuent aux prises de décisions, y compris la gestion des données du génie civil, de l'environnement, des données topographiques, géotechniques et géologiques, la gestion des actifs, la gestion de tous les travaux en cours ou à envisager, la gestion de l'espace, la gestion des risques, etc. Par conséquent, le modèle 3D de la ville doit analyser d'une manière holistique et intégrer tous les systèmes physiques, les paramètres sociaux, les règlements, etc.

Modèle à grande capacité d'analyse

La robustesse du modèle 3D de la ville proposé est sa capacité d'analyser les différentes tendances qui aident à la prise de décision. Le Tableau 3 résume quelques tendances envisagées et qu'il reste à développer selon le contexte.

4.3.2 Facteurs d'atténuations du modèle

La technologie d'aujourd'hui permet de prédire le succès de la conception du modèle 3D de la ville proposé par cette étude. L'internet et l'internet des objets sont à la portée de tous. L'intelligence artificielle s'apprête à envahir le monde. Les systèmes intelligents sont plus interconnectés qu'avant, ce qui facilite la fondation d'une ville intelligente. Un nombre illimité de données est stocké facilement dans un *Big data* ou sur le *cloud*. Les outils, logiciels et plateformes sont disponibles et devenus plus compétitifs. La géomatique est devenue indispensable dans plusieurs villes et ses nouveaux outils sont plus performants.

Tableau 3 - Tendances d'analyse du modèle proposé

Type de gestion	Tendances d'analyse (quelques exemples)
Gestion des données	<ul style="list-style-type: none"> - Collecter, stocker, analyser et diffuser des données - Contrôler l'efficacité et l'efficacité des données
Gestion des actifs	<ul style="list-style-type: none"> - Analyser le niveau de service requis (p. ex. l'éclairage des rues)
Gestion d'espace et des nouveaux projets de construction	<ul style="list-style-type: none"> - Intégrer et vérifier la conformité avec les règlements d'urbanisme (p. ex. zonage) - Analyser le potentiel solaire - Analyser le niveau de bruit - Analyser l'efficacité énergétique des constructions
Gestion de la mobilité urbaine	<ul style="list-style-type: none"> - Optimiser le mouvement des personnes et des biens d'un endroit à l'autre - Analyser la sécurité et l'accessibilité - Simuler les impacts environnementaux des modes de transport - Analyser le maintien de la circulation et de la congestion routière urbaine - Gérer des solutions aéroportuaires - Aider à la conception et la gestion des routes en milieu urbain
Gestion des eaux	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôler le volume et le calendrier de ruissellement des eaux pluviales - Détecter et analyser la possibilité et la fréquence des refoulements et des inondations - Prévoir la pollution potentielle de l'eau, donc protéger la qualité des plans d'eau - Étudier la distribution optimisée de l'eau et sa disponibilité à long terme - Évaluer l'aspect fonctionnel d'un réseau d'égout
Gestion de la qualité de l'environnement	Énergie : <ul style="list-style-type: none"> - Étudier la possibilité d'optimiser la consommation d'énergie - Analyser la meilleure façon de distribuer le gaz - Analyser le chauffage / refroidissement urbain
	Carbone : Estimer la quantité d'émission de gaz effet de serre
	Pollution : <ul style="list-style-type: none"> - Traiter les paramètres environnementaux lors de la conception des projets de construction - Aider à la gestion et la récupération des déchets : Économie circulaire
	Confort : <ul style="list-style-type: none"> - Gestion de la température et de l'humidité de l'air pour garantir le climat intérieur, etc.
Gestion des risques et de la sécurité publique	<ul style="list-style-type: none"> - Assurer des services publics intelligents (p. ex. la vidéo surveillance en temps réel)

4. DISCUSSION ET IMPLICATIONS

La gestion des villes rencontre plusieurs problèmes qui proviennent généralement d'une source mère qui est l'échange et la gestion des données, sous-tendant toute décision prise. Tout type de gestion résout une partie des problèmes de la ville, mais ne prend pas en considération l'interconnexion entre les systèmes. La solution proposée par cette recherche consiste en une gestion intégrée de l'ensemble des systèmes de la ville visant le développement durable et la résilience. C'est ainsi que cette recherche propose un nouveau modèle numérique paramétrique 3D de toutes les infrastructures de la ville. Son objectif premier est de connecter l'ensemble des systèmes de la ville.

Dans la section 2, cette revue de la littérature montre l'importance des données, et du fait d'en être propriétaire et gestionnaire. Le modèle sera plus performant puisque sa fonction dépasse sa mission de stocker et structurer les données de la ville, puisque le modèle réussit à analyser et simuler les données et extrait les informations pertinentes pour la prise de décision.

Cette revue de la littérature détermine les tendances, concepts et processus existants qui peuvent aider les gestionnaires à optimiser leur processus décisionnel (BIM, CIM, GIS, Ville numérique, Ville intelligente, *Blockchain*). C'est ainsi que le nouveau modèle profite du potentiel de toutes ces clés de succès : le modèle doit utiliser des concepts de sécurité et de transparence des données comme le principe du projet IOTA et la *blockchain* est nécessaire. Le modèle exige la combinaison entre le BIM, GIS et CIM. Le BIM est non seulement utilisé pour les bâtiments, mais aussi pour les infrastructures urbaines (p. ex. ponts, routes, etc.). L'étude des deux concepts ville numérique et intelligente a conclu que la vision de cette recherche est identique à celle de la ville intelligente. Les différents objectifs de la ville intelligente coïncident avec les objectifs de cette recherche. Le modèle 3D à développer pour la ville est un modèle 3D d'une ville intelligente tout court.

Il existe plusieurs modèles 3D de villes, mais de types différents. La revue de la littérature, dans la section 3, analyse cinq modèles 3D de villes. La conception de ces modèles (la structure, les techniques utilisées, etc.) dépend du propriétaire du modèle, de sa stratégie et de ses objectifs. En d'autres termes, la stratégie derrière la conception manque de vision globale de l'ensemble des problèmes de la ville, ce qui empêche d'exploiter tout le potentiel que peut offrir un modèle 3D de la ville. Aucun modèle 3D de ville identifié pendant la recherche n'est interrogeable dans plusieurs secteurs. Les modèles existants ne s'appuient pas sur des indicateurs de performance en temps réel et avec une vision globale.

C'est ainsi que cette section propose les tendances d'analyse du nouveau modèle 3D interrogeable d'une ville. Ce dernier présente une grande capacité d'analyse. Il ne se limite pas à la visualisation, l'amélioration de la planification urbaine et l'analyse de bruit, mais inclut tous les paramètres aidant à la gestion des actifs, de la mobilité urbaine et des transports, des projets de construction, de la qualité de l'environnement, la gestion des eaux, etc. Il est capable de prévoir l'impact des décisions prises par les gestionnaires de la ville.

Le nouveau modèle permet la fluidité des données, il collecte les données en temps réel, les analyse et les simule tout en assurant la coordination entre les différentes données des systèmes de la ville. Ainsi, un tableau de bord qui synthétise les informations et les présente est intégré au modèle proposé. La forme du tableau de bord reste à développer. L'idée retenue est une forme humaine qui discute et débat des stratégies des gestionnaires en présentant les résultats

La conception du modèle proposé requiert la volonté de plusieurs parties prenantes : les instances gouvernementales/municipales, les donneurs d'ouvrage, les associations professionnelles, les chercheurs, etc. Réussir la conception de ce modèle 3D ne peut se

réaliser sans l'appui d'un mandat public qui accompagne et soutient la transition numérique de la ville. Le modèle proposé est en phase d'idéation et doit prendre en considération le contexte de sa réalisation. Il s'ensuit toute une réflexion sur les techniques et technologies à utiliser ainsi que son niveau de développement et de détail; une réflexion sur le flux de travail multiplateforme.

Certes, quelques limites peuvent se présenter comme le risque de la sécurité de l'information; le risque d'incapacité de faire face à une situation d'urgence; le risque de non-acceptabilité politique; etc. Mais certaines limites aujourd'hui constitueront de bonnes questions à résoudre lors de la conception.

Il ne reste qu'à faire confiance à l'intelligence humaine et tirer parti du projet proposé pour garantir performance, valeur et efficacité.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abiteboul, S. 2012. Sciences des données : de la logique du premier ordre à la Toile. Repéré à <https://books.openedition.org/cdf/529#bodyftn5>

AccuCities. 2018. Repéré à <http://www.accucities.com/>

Ahmed, F. C., & Sekar, S. 2015. Using three-dimensional volumetric analysis in everyday urban planning processes. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 8(4), 393-408.

Al-Hader, M., & Rodzi, A. 2009. The smart city infrastructure development and monitoring. *Theoretical & Empirical Researches in Urban Management*, 2, 11.

Arup Report. 2017. Blockchain Technology. How the Inventions Behind Bitcoin are Enabling a Network of Trust for the Built Environment.

Azhar, S., Nadeem, A., Mok, J. Y., & Leung, B. H. 2008. Building Information Modeling (BIM): A new paradigm for visual interactive modeling and simulation for construction projects. Dans Proc., First International Conference on Construction in Developing Countries (Vol. 1, pp. 435-446).

Bentley. 2018. About BIM. Repéré à <https://www.bentley.com/en%20US/Solutions/Buildings/About%20+BIM.htm>

BIMhub. 2018. BIMhub: Level Up BIM Service. Benefits of BIM. Repéré à <http://www.bimhub.com/level-bim/>

Blake S. 2018. Unsplash Photos for everyone. [Image en ligne]. Tirée de : <https://unsplash.com/photos/1GW45VDkFI0>

Blockchain France. (s-date). Qu'est-ce que la blockchain ? [Image en ligne]. Tirée de : <https://blockchainfrance.net/decouvrir-la-blockchain/c-est-quoi-la-blockchain/> Accès en Décembre 2018

Boston Consulting Group. 2012. Vos données personnelles valent 315 milliards d'euros Repéré à <https://www.01net.com/actualites/vos-donnees-personnelles-valent-315-milliards-d-euros-579867.html>

Boston Consulting Group. 2016. Digital in Engineering and Construction. The Transformative Power of Building Information Modeling. Repéré à <http://futureofconstruction.org/content/uploads/2016/09/BCG-Digital-in-Engineering-and-Construction-Mar-2016.pdf>

Bradley, A., Li, H., Lark, R., & Dunn, S. 2016. BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. *Automation in Construction*, 71, 139-152.

Clark D. 2004. The Continuum of Understanding. [Image en ligne]. Tirée de : <http://www.nwlink.com/~donclark/performance/understanding.html> Accès en Décembre 2018

Cocchia, A. 2013. Smart and digital city: a systematic literature review. In: NOSTRO LIBRO.

Dameri, R. P. 2013. Searching for smart city definition: a comprehensive proposal. *International Journal of Computers & Technology*, 11(5), 2544-2551(Council for Innovative Research).

Dameri, R. P. 2014. Comparing Smart and Digital City: initiatives and strategies in Amsterdam and Genoa. Are they Digital and/or Smart? Dans *Smart city* (pp. 45-88). Springer.

Dionne B. G. 2017. Présentation «La micro-géodésie au service des professionnels ». Les nouveaux outils pour soutenir le BIM. Repéré à <https://www.bimquebec.org/>

Dnd F. 2017. Unsplash Photos for everyone. [Image en ligne]. Tirée de : <https://www.pexels.com/fr-fr/photo/appareil-photo-drone-vol-voler-2100075/>

Dykes, J. 2010. GeoVisualization and the digital city. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 443–451. Elsevier.

Eadie, R., Odeyinka, H., Browne, M., McKeown, C., & Yohanis, M. 2014. Building information modelling adoption: an analysis of the barriers to implementation. *Journal of Engineering and Architecture*, 2(1), 77-101.

Epstein, J. 2017. Why you want blockchain-based AI, even if you don't know it yet. Repéré à <https://venturebeat.com/2017/12/23/why-you-want-blockchain-based-ai-even-if-you-dont-know-it-yet/>

Floridi, L.. 2013. *The Philosophy of Information*, OUP Oxford.

Gould, L. 2010. *What is BIM... and should we care?* *Construction Research and Innovation*, 1(2), 26-31.

GVA. 2018. Repéré à <https://www.gva.co.uk/>

Halama S. 2017. Unsplash Photos for everyone. [Image en ligne]. Tirée de : <https://unsplash.com/photos/Pk5IA7eUvCM>

Hall, P. 2000. Creative cities and economic development. *Urban Studies*, 37(4), 633–649.

Howard, R., & Björk, B.-C. 2008. Building information modelling—Experts' views on standardisation and industry deployment. *Advanced Engineering Informatics*, 22(2), 271-280.

Hutsel, S., & Bush, L. 2016. La conjonction de BIM, GIS et CIM [Image en ligne]. Integrated Data Capture, BIM, CIM, GIS, and CAD-Owner and Industry Perspectives on Products, Processes and Policies for Informed Decision Making. SPAR 3D Expo and Conference. Repéré à <http://www.bowmanconsulting.com/Content/Downloads/Spar3D/2016%20USACE-Bowman%20SPAR3D%20-%20presentation%20version%20-%2020160413.pdf>

Kinnaird, C., Geipel, M., & MBE, M. B. 2017. Blockchain Technology. How the Inventions Behind Bitcoin are Enabling a Network of Trust for the Built Environment. Arup report.

Koeninger, A., & Bartel, S. 1998. 3D-GIS for urban purposes. *GeoInformatica*, 2(1), 79–103.

Koutsogiannis, A. 2017. Go Mobile, Go Cloud. But Keep the Data! Repéré à <https://geniebelt.com/blog/go-mobile-go-cloud-but-keep-the-data>

Koutsogiannis, A., & Berntsen, N. 2017. Blockchain and construction: the how, why and when. Repéré à <http://www.bimplus.co.uk/people/blockchain-and-construction-how-why-and-when/>

Law, C.-w., Lee, C.-k., Lui, A. S.-w., Yeung, M. K.-l., & Lam, K.-c. 2011. Advancement of three-dimensional noise mapping in Hong Kong. *Applied Acoustics*, 72(8), 534-543.

Lee, J., & Kwan, M.-P. 2005. A combinatorial data model for representing topological relations among 3D geographical features in micro-spatial environments. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(9), 1039–1056.

Leica Geosystems. 2018a. Opti-cal surveyequipment.com. [Image en ligne]. Tirée de : <https://surveyequipment.com/leica-blk360-imaging-laser-scanner/> Accès en Décembre 2018

Leica Geosystems. 2018 b. Opti-cal surveyequipment.com. [Image en ligne]. Tirée de : <http://www.bimactu.com/rubrique-toutes/sujet-les-logiciels-et-materiels/editeur-ou-fabricant-Leica-Geosystems.html> Accès en Décembre 2018

Local Government Amendment. 1996. Act (No 3). Repéré à <http://legislation.govt.nz/act/public/1996/0083/latest/DLM394123.html>

Lombardi, P., & al. 2012. Modelling the smart city performance. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 25(2), 137–149.

Mao, B., Harrie, L., Cao, J., Wu, Z., & Shenc, J. 2014. NOSQL based 3D city model management system. In H. Zhang, & J. Jiang (Eds.), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XL-4). The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-4-169-2014.

McGloin D. 2015. Unsplash Photos for everyone. [Image en ligne]. Tirée de : <https://unsplash.com/photos/iVguHY5hPXs>

McGraw-Hill. 2012. The business value of BIM in North America: multi-year trend analysis and user ratings (2007-2012). *Smart Market Report*. Repéré à <https://bimforum.org/wp-content/uploads/2012/12/MHC-Business-Value-of-BIM-in-North-America-2007-2012-SMR.pdf>

Mckinsey Global industrie. 2017. Les nouvelles technologies, une révolution qui n’a rien de tranquille. Repéré à <https://www.desjardins.com/ressources/pdf/per1117f.pdf?resVer=1511981381000>

Municipalité d’Abu Dhabi. 2018. Repéré à <https://dmat.abudhabi.ae/ar/ADM/Pages/Home.aspx>

Neuer, L. 2018. Ceux qui détiennent les données possèdent le pouvoir. Repéré à http://www.lepoint.fr/chroniqueurs-du-point/laurence-neuer/ceux-qui-detiennent-les-donnees-possedent-le-pouvoir-23-03-2018-2204904_56.php

Northstream. 2010. White paper on revenue opportunities, Repéré à <http://northstream.se/white-paper/archive>. OQLF (Office québécois de la langue française), 2017. FICHE TERMINOLOGIQUE. chaîne de blocs. Repéré à http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26531717

Pages Jaunes. 2007. Ville en 3D. Repéré à <http://v3d.pagesjaunes.fr/>

Parliamentary counsel office. 1996. Local Government Amendment Act (No 3) 1996. Repéré à <http://legislation.govt.nz/act/public/1996/0083/latest/DLM394123.html>

Qi, L. & Shaofu, L. 2001. Research on digital city framework architecture. *IEEE International Conferences on Info-Tech and Info-Net*, vol. 1, (pp. 30–36). Proceedings ICII.

Qing, Z., Mingyuan, H., Yeting, Z., & Zhiqiang, D. 2009. Research and practice in three-dimensional city modeling. *Geo-spatial Information Science*, 12(1), 18–24.

Rezgui, Y., Beach, T., & Rana, O. 2013. A governance approach for BIM management across lifecycle and supply chains using mixed-modes of information delivery. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(2), 239-258.

Ross, L., Bolling, J., Döllner, J., & Kleinschmit, B. 2009. Enhancing 3D city models with heterogeneous spatial information: towards 3D land information systems (pp. 113–133). Heidelberg: Springer. AGILE.

Rumble T. 2018. Unsplash Photos for everyone. [Image en ligne]. Tirée de : <https://unsplash.com/photos/7lvzopTxjOU>

Schiewe, J., Krek, A., Peters, I., Sternberg, H., & Traub, K. P. 2008. HCU research group “Digital City”: developing and evaluating tools for urban research. In: Ehlers & al. (Eds.) Digital earth summit on geoinformatics.

SETIS (Strategic Energy Technologies Information System). 2012. European Initiative on Smart Cities. Repéré à <https://setis.ec.europa.eu/set-plan-implementation/technology-roadmaps/european-initiative-smart-cities>

SmartMarket Report. 2017. La valeur du BIM pour les infrastructures 2017, P 13 et 14. Repéré à www.construction.com

Sorrentino, M. & Simonetta, M. 2013. Incentivising inter-municipal collaboration: the Lombard experience. *Journal of Management and Governance*, 17(4), 887–906.

Söderström, O., Paasche, T., & Klauser, F. (2014). Smart cities as corporate storytelling. *City*, 18(3), 307-320.

Teo Ai Lin E. 2017. Le BIM connecte les gens, le projet et les produits. Construction21, France. Repéré à https://www.construction21.org/france/articles_/fr/evelyn-teo-ai-lin-le-bim-connecte-les-gens-le-projet-et-les-produits.html

Wikimedia commons. 2017. *IOTA (criptomoeda)*. [Image en ligne]. Tirée de : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tangleimage.jpg> Accès en Décembre 2018

Wikipedia. 2018. Repéré à <https://en.wikipedia.org/wiki/Blockchain>

Wu, Y., Zhang, W., Shen, J., Mo, Z., & Peng, Y. 2018. Smart city with Chinese characteristics against the background of big data: Idea, action and risk. *Journal of Cleaner Production*, 173, 60-66.

Yuan, Y. M., & al. 2012. Architecture and data vitalization of smart city. *Advanced Materials Research*, 403, 2564–2568.

Zaman, S. 2018. 3D model to help with Abu Dhabi's urban planning. Repéré à <https://gulfnews.com/news/uae/general/3d-model-to-help-with-abu-dhabi-s-urban-planning-1.751579>