



N° d'ordre NNT : 2020LYSE2026

## THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

**École Doctorale : ED 512 Informatique et Mathématiques**

Discipline : Informatique

Soutenue publiquement le 10 septembre 2020, par :

Vincent JAILLOT

---

# **3D, temporal and documented cities : formalization, visualization and navigation**

---

Devant le jury composé de :

Jérôme GENSEL, Professeur des universités, Université GRENOBLE ALPES, Président

Christophe CLARAMUNT, Professeur des universités, BCRM Brest École Navale, Rapporteur

Sidonie CRISTOPHE, Directrice de Recherche, Institut National Géographique, Examinatrice

Thérèse LIBOUREL, Professeure émérite, Université Montpellier 2, Examinatrice

Livio DE LUCA, Directeur de Recherche, C.N.R.S. Marseille, Examineur

Isabelle LEFORT, Professeure des universités, Université Lumière Lyon 2, Encadrante

Sylvie SERVIGNE, Maître de conférences, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Encadrante

Gilles GESQUIERE, Professeur des universités, Université Lumière Lyon 2, Directeur de thèse

## Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas d'utilisation commerciale – pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

## Résumé de thèse en français

**Titre anglais :** 3D, temporal and documented cities: formalization, visualization and navigation

**Titre français :** Villes numériques 3D temporelles et documentées : formalisation, visualisation et navigation



## Contexte

L'espace urbain évolue et se développe à différents niveaux de granularité dans l'espace et dans le temps, de telle sorte que les villes subissent un étalement horizontal et vertical. Des bâtiments sont construits, des toits sont restaurés, des quartiers sont réaménagés, des ponts sont détruits, des parcs sont créés, etc. La figure 1 montre l'évolution des villes de Séoul entre 1900 et 2016 et d'Abu Dhabi entre 1970 et 2016<sup>1</sup>. Les projections actuelles<sup>2</sup> prévoient que le nombre de personnes vivant dans les zones urbaines passera de 55% actuellement à 68% en 2050, ce qui va entraîner d'encore plus profondes modifications des villes dans les années à venir. Dans ce contexte, la compréhension de la ville, de son évolution et de la façon dont les gens y vivent devient une question de société importante.

### Seoul, South Korea



### Abu Dhabi, United Arab Emirates



Figure 1. Exemple d'évolution des villes de Séoul, en Corée du Sud, et d'Abu Dhabi, aux Émirats Arabes Unis, avec des photos prises à différentes dates. Images issues de : <https://www.boredpanda.com/how-famous-city-changed-timelapse-evolution-before-after>

Les *modèles de ville 3D* sont des représentations numériques des zones urbaines avec des éléments géométriques, thématiques et géoréférencés en 3D à différentes échelles. Ces éléments sont communément appelés *objets de la ville* et ils font référence aux bâtiments, arbres, parcs, ponts, tunnels, mobilier urbain, etc. Les modèles de ville 3D ont été largement utilisés ces dernières années dans la recherche et l'industrie, pour de nombreuses applications telles que la préservation et le partage du patrimoine culturel, les analyses de la demande

<sup>1</sup> L'échelle et les points de vue des images ne sont pas exactement les mêmes. Cependant, ces images permettent de mettre en évidence l'évolution de ces villes.

<sup>2</sup> <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

énergétique, la cartographie du bruit, les simulations environnementales, etc. [Dö+06; Bil+14; Bil+15].

Avec le développement des technologies du web et par leur apparition dans des applications populaires telles que Google Maps<sup>3</sup> (voir figure 2), les modèles de ville en 3D commencent également à être utilisés par des non experts. Si les modèles 3D utilisés par Google ont une dimension géométrique détaillée, ils ne sont pas disponibles et il y a peu d'informations sur leur format, leur couverture spatiale et temporelle, les informations thématiques qui y sont associées, etc. Cependant, plusieurs villes comme Lyon<sup>4</sup>, Berlin<sup>5</sup> ou New York<sup>6</sup> donnent leurs modèles de ville 3D en libre accès et dans des formats standards, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles méthodes et à de nouveaux outils.

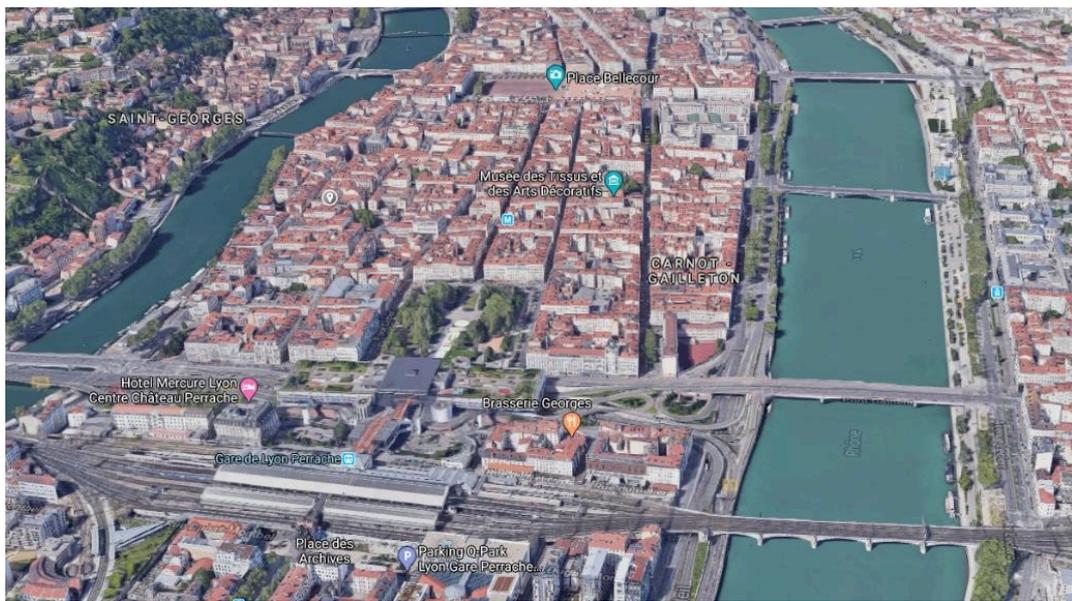


Figure 2. Capture d'écran de la ville de Lyon, France, en mode 3D de Google Maps.

L'histoire du développement d'une ville est essentielle pour aider à sa compréhension. La préservation et l'analyse des villes passées et présentes et la planification des villes de demain sont essentielles pour prendre des décisions appropriées pour l'avenir. Les données et les outils représentant l'évolution des villes ont de nombreuses applications telles que l'aide aux écologistes pour étudier l'évolution du bilan énergétique des villes ou aux urbanistes pour planifier l'évolution future de la ville. En outre, ils peuvent aider à répondre à des questions telles que *Quel est le cycle de vie d'un bâtiment spécifique ? Pourquoi la structure de ce réseau routier a-t-elle évolué ? Comment un bâtiment ordinaire peut-il devenir un élément du patrimoine culturel populaire ?* etc. La gestion de la dimension temporelle des villes est donc essentielle.

<sup>3</sup> <https://www.google.com/maps>

<sup>4</sup> <https://data.grandlyon.com/jeux-de-donnees/maquettes-3d-texturees-a-commune-arrondissement-2009-2012-2015-metropole-lyon/info>

<sup>5</sup> <https://www.businesslocationcenter.de/en/economic-atlas/download-portal/>

<sup>6</sup> <https://www1.nyc.gov/site/doitt/initiatives/3d-building.page>

Les modèles de ville en 3D ne suffisent cependant pas à eux seuls pour comprendre la ville et son évolution. D'autres éléments provenant de sources diverses peuvent fournir des éléments complémentaires conduisant à des analyses plus complètes de la ville et donc à des éléments supplémentaires de compréhension de la ville. Les documents multimédias, par exemple, constituent un matériel essentiel pour expliquer l'évolution de la ville, pour décrire des événements spécifiques qui ont eu lieu dans la ville, etc. Les images, les enregistrements audio et vidéo, les cartes postales, les articles de journaux, etc. sont porteurs d'informations nombreuses et précieuses. La collecte, le partage et l'exploitation des documents contribuent à la préservation des connaissances communes. Ils décrivent les villes, leur évolution et la façon dont les gens y vivent. Combinés à l'évolution de la ville, ils permettent également de répondre à des questions telles que *Comment était la ville à une époque donnée et comment pouvons-nous le prouver ?* En outre, Münster *et al.* [Mü+20] souligne que la consultation de documents multimédia dans des archives physiques ou dans des dépôts en ligne peut être longue et même contre-productive, surtout si l'on considère le nombre et la diversité des documents disponibles. Ils soulignent également que l'utilisation d'interfaces 3D et de modèles de ville 3D peut améliorer la *navigation* dans les documents multimédias (c'est-à-dire accès, interrogation), qui met en évidence la nécessité d'intégrer des modèles de ville en 3D et des documents multimédias.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet *Fab-Pat*<sup>7</sup> financé par le LabEx IMU<sup>8</sup> (Intelligences des mondes urbains). *Fab-Pat* se concentre sur le *partage du patrimoine culturel urbain* et sur l'implication des citoyens et des associations dans la *fabrique du patrimoine urbain*. Ce projet rassemble des chercheurs en informatique (dans les domaines de la science des données et de l'informatique avec une expertise sur les données géospatiales), en sciences sociales (dans les domaines de l'anthropologie et de la géographie avec une expertise spécifique sur le patrimoine culturel) et des experts du département du patrimoine culturel de la ville de Lyon, des musées Gadagne<sup>9</sup> et Confluence<sup>10</sup>. Dans ce contexte, une enquête sur les outils numériques du patrimoine urbain et des entretiens avec des acteurs du patrimoine culturel dans la région de Lyon ont été réalisés. Ils ont confirmé la nécessité d'offrir de nouvelles possibilités de partage du patrimoine culturel par le biais de la *visualisation* et de la *navigation*. En effet, de nombreux outils pour la valorisation du patrimoine urbain via le numérique consistent actuellement en une géolocalisation de documents multimédias sur des cartes en 2D. C'est autant le cas pour les petites associations locales (par exemple l'association Sites et Cités de Lyon), que pour les outils participatifs établis (par exemple PastPort), ou pour les organisations institutionnelles du patrimoine culturel (par exemple, le service du patrimoine culturel et de l'inventaire général de la région *Auvergne-Rhône-Alpes*<sup>11</sup>). Bien que ces initiatives partagent un contenu très intéressant, les possibilités de navigation pourraient être améliorées et davantage d'informations pourraient être affichées grâce à l'intégration de modèles de villes en 3D.

---

<sup>7</sup> <https://imu.universite-lyon.fr/bilan-2016/fabpat-sharing-the-shaping-of-heritage-approach-and-issues-concerning-the-historical-urban-landscape-hul-2016/>

<sup>8</sup> <https://imu.universite-lyon.fr/>

<sup>9</sup> [http://www.gadagne.musees.lyon.fr/index.php/gadagne/\(lang\)/en](http://www.gadagne.musees.lyon.fr/index.php/gadagne/(lang)/en)

<sup>10</sup> <http://www.museedesconfluences.fr/fr/visit-museum>

<sup>11</sup> <https://patrimoine.auvergnerrhonealpes.fr/>

## Problématique

En se basant sur ce contexte et sur les objectifs de Fab-Pat, dans cette thèse, nous nous concentrons sur le problème de recherche suivant : **Comment intégrer la dimension temporelle et les documents multimédia aux modèles de villes 3D pour la visualisation et la navigation sur le web ?** Par visualisation et la navigation, nous entendons offrir aux utilisateurs des fonctionnalités leur permettant de rechercher, d'accéder et d'afficher des informations de modèles de ville 3D enrichis dans les dimensions spatiales, temporelles et thématiques ; avec diverses possibilités d'interaction : en se déplaçant dans l'espace, en faisant évoluer la date, en accédant à des documents multimédias à partir d'objets de ville 3D et à des objets de ville 3D à partir de documents multimédias. Cette problématique soulève plusieurs défis et conduit à deux questions de recherche détaillées dans ce qui suit.

Tout d'abord, certains défis sont liés à la visualisation et à la navigation des modèles de ville **3D**. Ces modèles peuvent en effet représenter des centaines de  $km^2$  de données (qui peuvent correspondre à des millions de primitives géométriques plus des informations thématiques). En outre, nous visons à proposer une visualisation et une navigation *interactives*, c'est-à-dire que notre système devrait fournir une réponse aux utilisateurs en quelques secondes. Ce défi est bien connu dans la communauté de l'informatique graphique. Toutefois, il est accentué par la nécessité de travailler dans un *contexte web* et avec des modèles de ville 3D qui ne comportent pas seulement une *géométrie 3D* (comme c'est généralement le cas en informatique graphique) mais aussi des *informations thématiques structurées* décrivant les objets et leurs relations (par exemple un bâtiment est composé d'un toit, de murs, de portes, etc.)

Deuxièmement, certains défis sont spécifiques à l'**intégration de la dimension temporelle aux modèles de ville en 3D**. Les changements dans la ville se produisent à différents niveaux de granularité dans l'espace (par exemple, la restauration des toits, la construction d'un nouveau pont, la rénovation d'un quartier, etc.) et dans le temps (les travaux de rénovation des éléments du patrimoine culturel peuvent prendre des années alors que la construction d'une maison peut prendre quelques mois). Il faut donc proposer une formalisation permettant de représenter les changements à *différents niveaux de granularité* dans l'espace et dans le temps. En outre, nous nous intéressons particulièrement au *cycle de vie* des objets de la ville, qui est essentiel pour comprendre l'évolution des villes. Enfin, nous voulons toujours garder une navigation et une visualisation *interactives*. Cela peut être un grand défi car l'ajout de la dimension temporelle peut augmenter considérablement le nombre d'objets de la ville à gérer et donc la taille des *jeux de données*. Cela conduit à la question de recherche suivante : **Comment formaliser la dimension temporelle des modèles de ville 3D pour une navigation interactive sur le web et une visualisation des changements qui se produisent à différents niveaux de granularité ?**

Troisièmement, **intégrer des documents multimédias à un modèle de ville en 3D pour la navigation et la visualisation sur le web** soulève d'autres défis. Les objets géographiques (y compris les documents multimédias et les modèles de ville 3D) sont généralement décrits dans une ou plusieurs des trois dimensions suivantes : thématique, géométrique et temporelle. La dimension thématique donne des informations contextuelles telles que la nature d'un objet

géographique ou des métadonnées sémantiques. La dimension géométrique contient des objets géométriques (par exemple, des points, des polygones) qui sont définis dans un système de coordonnées spatiales. Enfin, la dimension temporelle décrit la nature diachronique des éléments. En outre, les  *multiples possibilités de navigation*  ont été identifiées et peuvent être classés en deux types : l'interrogation des éléments selon une (ou plusieurs) de leurs dimensions et la navigation d'un (ou plusieurs) élément à un (ou plusieurs) autre élément associé. Dans le premier cas, les interrogations spatiales sont les plus courantes et consistent à accéder à des objets géographiques à un endroit donné ou dans une certaine zone. Dans le contexte d'un système 3D, cela peut se produire en se déplaçant dans un environnement 3D virtuel et en accédant à des objets géographiques qui se trouvent dans le champ de vision. Les requêtes sur les objets géographiques ont été classées en onze types par Yuan and McIntosh [YM02] : requêtes d'attributs, 3 requêtes spatiales, 3 requêtes temporelles et 4 requêtes spatio-temporelles. Pour ce type de navigation, l'intégration des objets géographiques peut être effectuée par le système d'interrogation lors de la présentation du résultat. Le deuxième type de navigation nécessite toutefois d'associer des objets géographiques de type différent, sur la base de critères spécifiques. Ces critères peuvent par exemple être thématiques : une image fait référence à un bâtiment (les images et le bâtiment étant deux entités thématiques). Ils peuvent également être spatiaux, c'est-à-dire basés sur des points de correspondance entre l'image et le bâtiment. Ces défis conduisent à la question de recherche suivante : **Comment intégrer des documents multimédias et des modèles de ville 3D pour la visualisation et la navigation sur le web ?** Notez que dans cette thèse, nous n'abordons pas les problèmes potentiels soulevés par la gestion de grandes quantités de documents multimédias et que nous nous concentrons sur la navigation et la visualisation.

Quatrièmement, ce contexte soulève également des  **défis technologiques** . La conception d'un système d'information gérant des informations géospatiales en 3D sur le web reste une tâche difficile [Min08; Cha+15; PD16]. L'une des principales difficultés réside dans le fait que le contexte actuel de la gestion des données géospatiales 3D sur le web repose sur des normes et des outils récents qui évoluent rapidement. Par exemple, le premier standard dédié à la modélisation des villes en 3D est CityGML [Kol09; Ope12] qui a été introduit en 2008, a subi des changements significatifs en 2012 dans sa version 2.0 et pour lequel une autre version avec des changements majeurs est prévue en 2020. Dans le contexte du web, les premières normes pour la gestion de gros jeux de données géospatiales en 3D n'ont été proposées que récemment : I3S [Ope17b] en 2017 et 3D Tiles [Ope19] en 2019. L'environnement technologique autour de ces standards est également émergent et instable. Par exemple, il n'existe actuellement aucune implémentation de référence fournie avec la norme CityGML. Par conséquent, le développement d'outils open source et stables pour gérer des données dans ces standards constitue un besoin actuel.

Enfin, nous visons à proposer des méthodes scientifiques et des logiciels qui soient  **reproductibles, réutilisables et interopérables** . La reproductibilité fait référence à la capacité de reproduire les résultats présentés dans cette thèse. La réutilisabilité fait référence à la proposition de contributions (qu'il s'agisse de contributions scientifiques ou logicielles) qui peuvent être réutilisées par la communauté scientifique. L'interopérabilité se réfère à la possibilité pour nos méthodes et nos composants logiciels d'interagir avec d'autres systèmes. Ces objectifs ont guidé les propositions scientifiques et logicielles de cette thèse.

## Contributions

Nous proposons tout d'abord des contributions portant sur la première question de recherche pour **intégrer la dimension temporelle aux modèles de ville en 3D** pour la navigation et la visualisation interactives sur le web. Nous proposons **Gen3DGeo**, un modèle conceptuel générique de modèles de ville 3D pour la visualisation et la navigation sur le web, basé sur des standards existants. En particulier, ce modèle est une abstraction des standards I3S et 3D Tiles mentionnés dans la partie précédente et constitue un modèle commun de ces derniers. De plus, ce modèle est basé sur les standards proposés par l'International Standardisation Organisation (ISO). Il constitue ainsi une contribution pour le domaine de l'information géospatiale en harmonisant des standards existants et en proposant un modèle conceptuel indépendant des aspects technologiques en présence. Nous formalisons et intégrons également la dimension temporelle des villes dans le modèle conceptuel **Gen4DCity** (voir figure 3). Gen4DCity représente des villes 4D (3D+T) pour leur navigation et visualisation sur le web, en se basant sur des standards existants. Nous spécifions ensuite ce modèle aux niveaux logique (modèle **Logic4DCity**) et spécification technique (modèle **3DTiles\_temporel**) en formalisant et en étendant la norme 3D Tiles, démontrant ainsi la possibilité d'intégration de notre proposition conceptuelle dans un standard établi dans la communauté géospatiale. Un exemple de visualisation d'une partie de la ville de Lyon en 2013 et en 2014 est présentée sur la figure 4. Les bâtiments en vert représentent les bâtiments créés, la couleur jaune représente les bâtiments modifiés et les bâtiments en rouge sont ceux qui sont détruits. Ces contributions sont publiées dans le journal *International Journal of Geographical Information Science* [Jai+20a] et une présentation a été réalisée au groupe de l'Open Géospatial Consortium travaillant sur les standards pour les données géospatiales 3D sur le web.

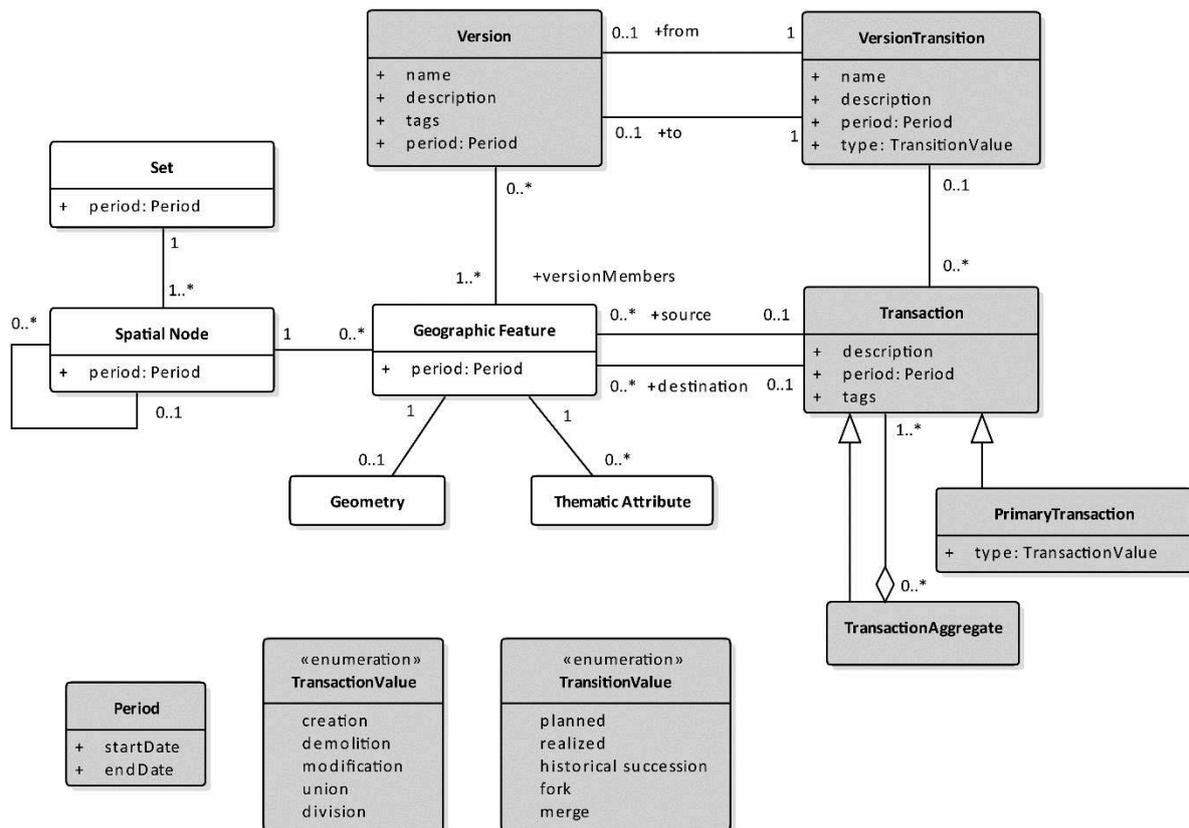


Figure 3. Gen4DCity : Modèle conceptuel de villes 4D (3D + temps) pour leur visualisation et navigation sur le web, basée sur des standards (3D Tiles et I3S). Les entités de Gen3DGeo, représentant une conceptualisation de 3D Tiles et I3S sont en blanc. La formalisation proposée de la dimension temporelle est représentée en gris.



Figure 4. Captures d'écran montrant l'évolution d'un quartier de la ville de Lyon (en 2013 sur la gauche et en 2014 sur la droite), basé sur des données en 3D Tiles étendu avec le modèle *3DTiles\_temporal* proposé dans cette thèse.

Deuxièmement, nous proposons des contributions pour l'intégration de **documents multimédias à des modèles de ville 3D** pour la navigation et la visualisation sur le web ; répondant ainsi à la deuxième question de recherche. Plus spécifiquement, nous proposons **GenLinkable**, un modèle conceptuel générique pour l'intégration d'objets géographiques.

Nous utilisons ensuite *GenLinkable* pour l'intégration de documents multimédias à notre modèle précédent (*Gen4DCity*), résultant en **Gen4DCity-Doc** (figure 5), un modèle de données représentant des villes 4D (3D + temps), enrichies avec des documents multimédias pour leur navigation et visualisation sur le web. Un exemple schématisé de l'intégration de documents à des objets de la ville 4D est présenté sur la figure 6.

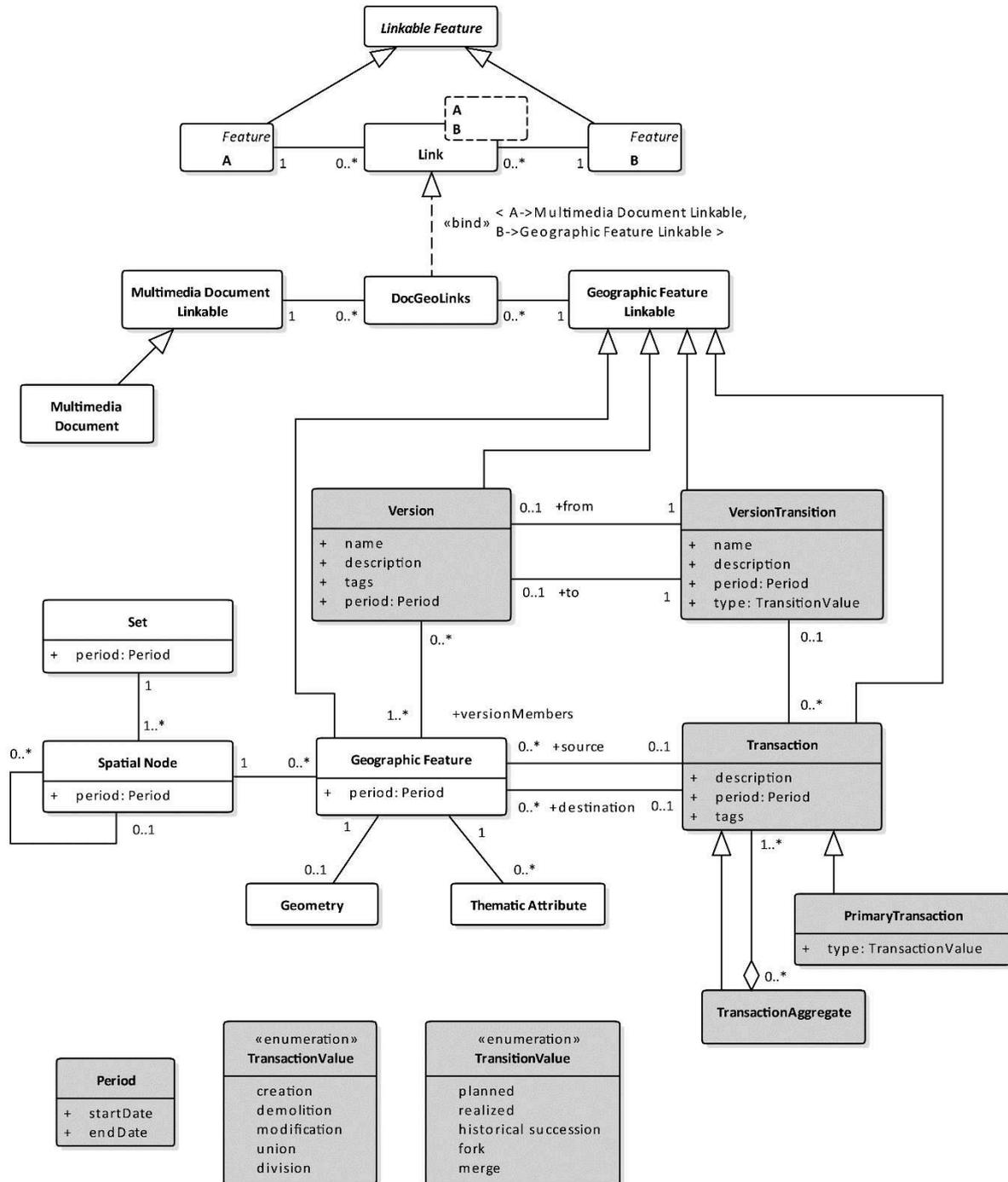


Figure 5. Gen4DCity-Doc : Modèle conceptuel générique intégrant des modèles de villes en 3D évoluant dans le temps et des documents multimédia.

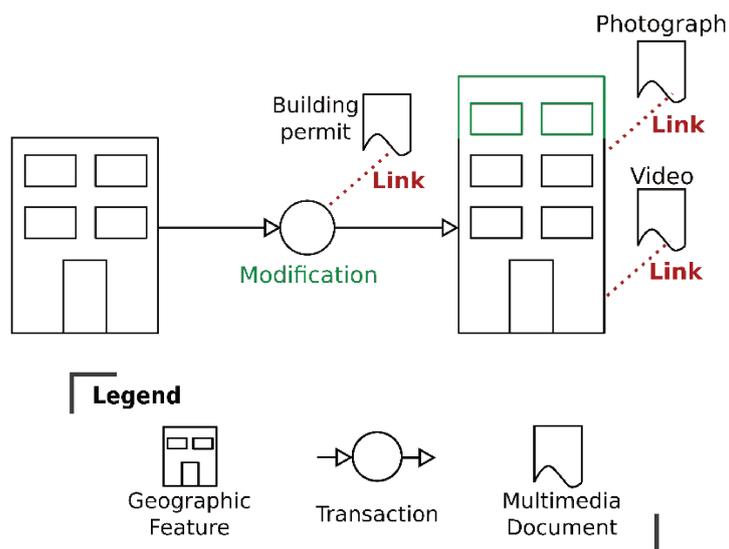


Figure 6. Exemple de liens entre des documents multimédias et des objets géographiques 4D.

Troisièmement, nous apportons des **contributions techniques**. Une mise en œuvre open source des contributions présentées ci-dessus est proposée et des notes détaillées, ainsi que des conteneurs permettant la reproduction les expériences sont également fournis. Nous proposons également un processus de calcul de modèles de ville 4D à grande échelle, que nous mettons à disposition en open source et reproductible (le résultat étant stocké en suivant le modèle *3DTiles\_temporal*). Ces contributions techniques sont implémentées dans une architecture web 4 tiers modulaire (figure 7) basée sur des composants open source et permettant de visualiser et de naviguer dans des modèles de ville 4D et documentés. Nous présentons également une méthodologie pour permettre la réutilisation de nos composants logiciels et à la reproductibilité de nos expériences.

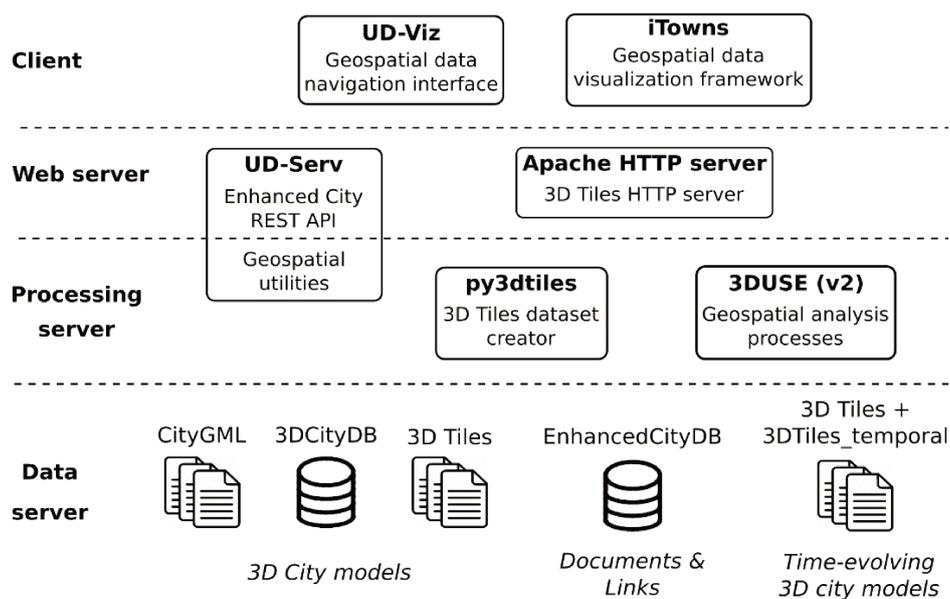


Figure 7. Architecture 4-tiers actuelle de UD-SV (Urban Data Services and Visualization), développé pendant cette thèse et contenant les contributions techniques proposées dans la thèse.

Enfin, nous proposons une **contribution multidisciplinaire** réalisée en collaboration avec des chercheurs du projet Fab-Pat : **DHAL** (Digital urban Heritage tools AnaLysis), une méthodologie conçue avec une approche multidisciplinaire pour décrire, comparer et analyser les outils numériques du patrimoine urbain. Ce besoin provient de la grande variété d'outils numérique pour le partage et l'enrichissement du patrimoine urbain qui ont été identifiés et de la nécessité de les comparer et de les analyser. Cette contribution implique Manon Istasse (post-doctorante en sociologie et anthropologie), Sylvie Servigne et Gilles Gesquière (chercheurs en informatique), Michel Rautenberg (chercheur en sociologie) et Isabelle Lefort (chercheuse en géographie) et moi-même. Cette contribution a donné lieu à un article publié dans le journal « Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage » [Jai+20b]. Des premières réflexions sur ce sujet ont également été proposées dans [U17]. Dans le manuscrit de thèse, nous proposons également une discussion concernant les collaborations multidisciplinaires qui ont eu lieu dans le cadre de cette thèse présentant les bénéfices et les limites ainsi que des éléments pour surmonter ces limites.

## Conclusion

Dans cette thèse, nous montrons que nos contributions relatives à l'intégration de la dimension temporelle aux modèles de villes 3D pour leur visualisation et navigation sur le web permet un gain significatif en termes de navigation temporelle (en passant d'une date à l'autre) sur des jeux de données à grande échelle (démontré pour des villes de plusieurs dizaines de km<sup>2</sup> dans notre cas) par rapport aux solutions existantes. Ces modèles permettent également de garder une trace de l'évolution des villes et des objets la constituant (bâtiments, ponts, parcs, etc.) et proposent une amélioration des modèles de données spatio-temporels pour les données géospatiales basés sur les graph. Dans un deuxième temps, nous montrons en quoi nos modèles pour l'intégration d'objets géographiques permettent une visualisation et une navigation thématique dans des modèles de ville 3D enrichis de données multimédias. Dans un troisième temps, nous présentons des contributions techniques open sources et reproductibles, répondant à un besoin de la communauté géospatiale 3D sur le web et à des attendus émergent sur la reproductibilité des résultats de recherche. Enfin, notre proposition permettant l'analyse et la comparaison d'outils pour la valorisation du patrimoine via le numérique, réalisée grâce à un travail pluridisciplinaire radical répond à un besoin d'analyse qualitatif de ces outils qui sont actuellement nombreux et variés. De plus, l'aspect pluridisciplinaire de cette thèse a permis d'enrichir cette contribution en croisant les points de vue, les méthodes et les vocabulaires.

## Bibliographie

**[Bil+15]** Filip Biljecki, Jantien Stoter, Hugo Ledoux, Sisi Zlatanova, and Arzu Çöltekin. “Applications of 3D city models: State of the art review”. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4.4 (2015), pp. 2842–2889.

**[Bil+14]** R. Billen, A.-F. Cutting-Decelle, O. Marina, et al. “3D City Models and urban information: Current issues and perspectives: European COST Action TU0801”. In: *3D City Models and urban information: Current issues and perspectives – European COST Action TU0801*. Ed. by R. Billen, A.-F. Cutting-Decelle, O. Marina, et al. Liège, Belgium: EDP Sciences, 2014, pp. 1–118.

**[Cha+15]** Kanishk Chaturvedi, Zhihang Yao, and Thomas H. Kolbe. “Web-based Exploration and Interaction with Large and Deeply Structured Semantic 3D City Models using HTML5 and WebGL”. In: *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und Workshop on Laser Scanning Applications*. Vol. 24. Cologne, Germany, 2015.

**[Dö+06]** Jürgen Döllner, Konstantin Baumann, and Henrik Buchholz. “Virtual 3D city models as foundation of complex urban information spaces”. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Urban Planning and Spatial Development in the Information Society*. Vienna, Austria, 2006.

**[IJ17]** Manon Istasse and Vincent Jaillot. “FAB-PAT: un atlas numérique participatif et évolutif pour partager la fabrique du patrimoine”. In: *Actes du colloque Le crowdsourcing pour partager, enrichir et publier des sources patrimoniales*. Angers, Oct. 2017, p. 11

**[Jai+20a]** Vincent Jaillot, Sylvie Servigne, and Gilles Gesquière. “Delivering time-evolving 3D city models for web visualization”. In: *International Journal of Geographical Information Science* (2020)

**[Jai+20b]** Vincent Jaillot, Manon Istasse, Sylvie Servigne, et al. “Describing, comparing and analysing digital urban heritage tools: A methodology designed with a multidisciplinary approach”. en. In: *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* (Jan. 2020).

**[Kol09]** Thomas H. Kolbe. “Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML”. en. In: *3D Geo-Information Sciences*. Ed. by Jiyeong Lee and Sisi Zlatanova. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 15–31.

**[Min08]** Wang Ming. “A 3D Web GIS System Based on VRML and X3D”. In: *2008 Second International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*. Jinzhou, China: IEEE, Sept. 2008, pp. 197–200.

**[Mü+20]** Sander Münster, Florian Niebling, Jonas Brusckke, et al. “Urban History Research and Discovery in the Age of Digital Repositories. A Report About Users and Requirements”. en. In:

*Digital Cultural Heritage*. Ed. by Horst Kremers. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 63–84.

**[Ope12]** Open Geospatial Consortium. *OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard 2.0.0*. Standard OGC 12-019. Apr. 2012.

**[Ope17b]** Open Geospatial Consortium. OGC Indexed 3d Scene Layer (I3S) and Scene Layer Package Format Specification v1.0. en. Standard 17-014r5. Sept. 2017, p. 92.

**[Ope19]** Open Geospatial Consortium. *OGC 3D Tiles Specification 1.0*. Standard 18-053r2. Jan. 2019.

**[PD16]** I. Pispidikis and E. Dimopoulou. “Development of a 3D WebGIS system for retrieving and visualizing CityGML data based on their geometric and semantic characteristics by using free and open source technology”. en. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W1* (Oct. 2016), pp. 47–53.

**[YM02]** May Yuan and John McIntosh. “A Typology of Spatiotemporal Information Queries”. en. In: *Mining Spatio-Temporal Information Systems*. Ed. by Roy Ladner, Kevin Shaw, and Mahdi Abdelguerfi. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Boston, MA: Springer US, 2002, pp. 63–81.