



HAL
open science

Représentations et dynamique de la ville virtuelle

Frédéric Pedrinis

► **To cite this version:**

Frédéric Pedrinis. Représentations et dynamique de la ville virtuelle. Intelligence artificielle [cs.AI]. Université de Lyon, 2017. Français. NNT : 2017LYSE2092 . tel-01624392v1

HAL Id: tel-01624392

<https://hal.science/tel-01624392v1>

Submitted on 26 Oct 2017 (v1), last revised 5 Oct 2020 (v2)

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

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

Université Lumière Lyon 2

Laboratoire LIRIS

École Doctorale 512 : Informatique et Mathématique

Représentations et dynamique de la ville virtuelle

Frédéric PEDRINIS

Discipline : Informatique et applications

Sous la direction de Gilles GESQUIERE

Document provisoire. Soutenance prévue le 17 Octobre 2017

Composition du jury :

Mme. Anne RUAS, Ingénieure de recherche (ICPEF), HDR, IFSTTAR - Rapportrice

M. Romain RAFFIN, Maître de Conférences HDR, Aix-Marseille Université - Rapporteur

Mme. Marjorie MUSY, Directrice de Recherche (DR2), Cerema Ouest - Examinatrice

M. William PUECH, Professeur des Universités, Université de Montpellier - Examineur

M. Benoit GOURGAND, Ingénieur, Métropole de Lyon – Invité

M. Gilles GESQUIERE, Professeur des Universités, Université Lumière Lyon 2 - Directeur de thèse

Représentations et dynamique de la ville virtuelle

Résumé

Les modélisations 3D de ville se multiplient à travers le monde et deviennent aujourd'hui accessibles grâce à la volonté des communes de les proposer librement. Il est ainsi aujourd'hui possible d'accéder à plusieurs milliers de kilomètres carrés de territoires urbains modélisés en 3D.

Nous présentons dans cette thèse un ensemble de méthodes permettant d'enrichir un modèle virtuel 3D de ville, de l'organiser afin de faciliter son utilisation, puis de l'analyser en détectant les changements entre deux millésimes ou en mesurant son ambiance visuelle selon les besoins de l'utilisateur. Nous proposons dans un premier temps un algorithme permettant de compléter un modèle 3D en y adjoignant une définition sémantique grâce au cadastre, ainsi qu'une méthode de calcul de la canopée végétale 3D par croisement de données. Puis nous proposons des stratégies d'organisation du modèle 3D de la ville selon des critères géométriques et sémantiques afin de faciliter son parcours. Nous présentons ensuite des méthodes comparant deux millésimes de données représentant un même territoire dans le but de produire un unique modèle temporel contenant un ensemble de versions. Enfin, nous cherchons à mesurer l'ambiance visuelle de la ville via l'analyse de la composition d'un champ de vision ainsi que de l'ensoleillement et des ombres portées présentes sur un territoire. Ces mesures peuvent être liées à des données externes afin de proposer de multiples interprétations en fonction des besoins de l'utilisateur.

Tous ces travaux se font dans un contexte d'interopérabilité et de généricité puisqu'ils ont pour objectif de pouvoir être utilisés avec des jeux de données provenant du monde entier. Nous basons donc nos méthodes sur l'utilisation de standards internationaux aussi bien pour les données en entrée que pour les résultats en sortie. Il est ainsi possible, dans le cadre d'une approche voulue dans un contexte de pluralité scientifique au sein du LabEx IMU, de mettre à disposition de la communauté les résultats mais aussi nos algorithmes proposés au sein d'un logiciel développé en open source.

Mots-clés : Modélisation 3D, modèles virtuels de ville, SIG, CityGML, interopérabilité.

Representations and dynamics of the virtual city

Abstract

3D virtual models of cities are multiplying throughout the world and now become accessible thanks to the will of the communes to propose them freely. Today, it is possible to access several thousand square kilometres of urban territories modelled in 3D.

We present in this thesis a set of methods to enrich a 3D virtual city model, organize it to facilitate its use and then analyse it by detecting changes between two vintages or by measuring its visual atmosphere according to the user's needs. We first propose an algorithm to complete a 3D model by adding a semantic definition thanks to the cadastre, and a method to compute the 3D plant canopy by crossing data. Then we propose strategies to organize the 3D model of the city according to geometric and semantic criteria in order to facilitate its browsing. We then present methods comparing two vintages of data representing the same territory in order to produce a single temporal model containing a set of versions. Finally, we try to measure the visual atmosphere of the city by analysing the composition of a field of vision as well as the amount of sunshine and the shadows on a territory. These measurements can be linked to external data in order to propose multiple interpretations according to the user's needs.

All this work is done in a context of interoperability and genericity since it aims to be used with datasets from all over the world. We therefore base our methods on the use of international standards for both input and output data. It is thus possible, in a context of scientific plurality within the LabEx IMU, to make available to the community the results but also our algorithms proposed within an open source developed software.

Keywords: 3D modelling, virtual city models, GIS, CityGML, interoperability.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Gilles Gesquière, mon directeur de thèse qui a été très présent tout au long de mon travail de recherche. Nos nombreuses discussions ont été le principal moteur de ma thèse et je le remercie pour son soutien et sa confiance qui m'ont accompagné et motivé jusqu'au bout. Son réseau de connaissances et sa grande activité auprès de la communauté liée aux mondes urbains m'ont permis de faire la connaissance de nombreux acteurs avec lesquels j'ai pu ensuite collaborer ou même discuter.

Je remercie dans ce cadre le LabEx IMU, d'abord pour m'avoir permis de me consacrer sereinement à ma thèse grâce à son financement, ensuite pour sa volonté de faciliter les échanges entre chercheurs et praticiens de différents domaines qui m'a permis de faire de nouvelles rencontres, notamment au sein de l'association de jeunes chercheurs IMU Alpha.

J'ai eu la chance de pouvoir échanger régulièrement avec la Métropole de Lyon et son service « Données de référence et 3D », et je tiens donc à remercier Manuel Plane et Jérémy Boureau, ainsi que toute leur équipe, pour leur grande disponibilité et la qualité des échanges que nous avons pu avoir tout au long de ma thèse.

Je remercie par ailleurs tous les membres du projet VCity du laboratoire LIRIS avec lesquels j'ai travaillé pendant ces quelques années, je me réjouis de voir que vous êtes de plus en plus nombreux et que le projet semble maintenant reposer sur de solides fondations qui lui permettront de produire des résultats qui s'annoncent très prometteurs dans les années à venir.

Enfin, je remercie Madame Ruas et Monsieur Raffin qui ont accepté de rapporter sur mon manuscrit, ainsi que Madame Musy, Monsieur Puech et Monsieur Gourgand qui ont accepté de faire partie de ce jury.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
1. Introduction	9
2. Etat de l'art	17
2.1 Multiplication des modèles virtuels 3D de la ville	18
2.1.1 Représentations virtuelles de la ville	18
2.1.2 Modèles virtuels 3D de la ville disponibles	30
2.1.3 Méthodes de création et d'amélioration de ces modèles 3D	32
2.1.4 Les standards permettant d'échanger les modèles virtuels de la ville	40
2.2 Analyse des modèles virtuels de la ville	45
2.2.1 Détecter les changements apparus entre deux modèles urbains	46
2.2.2 Etudes de visibilité	48
2.2.3 Etudes d'ensoleillement et mesures de l'ombre	51
3. Enrichir le modèle virtuel de la ville	55
3.1 Améliorer les modèles 3D	55
3.1.1 Reconstruction de modèles 3D de bâtiments sémantiquement enrichis par le cadastre	56
3.1.2 Création d'un modèle 3D de végétation	74
3.1.3 Synthèse	82
3.2 Structure de données pour représenter la ville 3D	85
3.2.1 Tuilage en grille régulière	87
3.2.2 Semantic Bounding Volume Hierarchy	91
3.2.3 Hiérarchie d'îlots urbains	93
3.2.4 Synthèse et applications	103
4. Mesurer la ville	107
4.1 Détections de changements	108
4.1.1 Comparaison de modèles 3D de bâtiments	109
4.1.2 Comparaison entre un modèle 3D et un nuage de points LiDAR	120
4.1.3 Comparaison entre deux nuages de points LiDAR	123
4.1.4 Synthèse	124
4.2 Mesurer l'ambiance du territoire	127
4.2.1 Mesurer la composition visuelle d'un paysage urbain	129
4.2.2 Mesurer l'impact en termes d'ombre et d'ensoleillement des objets urbains	151
4.2.3 Synthèse	164
5. Conclusion	165

5.1 Bilan	165
5.2 Perspectives	169
Annexe 1 : Génération des emprises au sol.....	173
Annexe 2 : Calcul de la distance de Hausdorff	175
Annexe 3 : Typer le modèle numérique de terrain.....	179
Bibliographie.....	181
Liste des publications.....	199

1. Introduction

Les modèles virtuels de la ville offrent une représentation de plus en plus complète des territoires urbains, et sont utilisés dans de nombreux domaines allant par exemple de l'aménagement urbain aux simulations de risques naturels. Nous définissons la notion de modèle virtuel de la ville comme étant un regroupement d'objets décrivant le territoire d'une ville. Chaque objet peut être défini par un type (un bâtiment, une route, une rivière, etc.), un identifiant unique, une géométrie, une topologie, ainsi que des informations sémantiques le décrivant (adresse d'un bâtiment, profondeur d'une rivière, etc.). Un objet peut également être composé d'éléments ayant une définition propre (comme les murs, les portes ou les fenêtres d'un bâtiment). Ces modèles peuvent prendre différentes formes, en fonction des méthodes d'acquisition ou de génération employées, mais également en fonction des besoins correspondant à leurs diverses utilisations. Il est par ailleurs souvent nécessaire de croiser différents jeux de données pour répondre à un besoin nécessitant des informations ne pouvant être contenues dans un unique modèle.

C'est notamment le cas de nombreuses applications faisant intervenir des modèles 3D, qui sont maintenant exploités dans des contextes bien moins restrictifs que ceux les utilisant uniquement en simple support de visualisation comme c'était le cas il y a encore quelques années avec des outils bien connus comme Google Earth¹.

Ce domaine lié aux modèles virtuels de la ville implique également des acteurs et des disciplines variés dont les connaissances respectives sont souvent nécessaires pour pouvoir répondre à une problématique faisant converger leurs intérêts. Ces modèles virtuels de la ville peuvent par exemple ainsi réunir autour d'une même problématique des informaticiens, des urbanistes, des géographes et des historiens.

Cette pluralité disciplinaire des acteurs engagés ainsi que les besoins variés en termes de modélisation des données participent activement à l'amélioration des modèles virtuels de la ville et facilitent la compréhension globale des territoires urbains. Cependant, ces différences peuvent également faire apparaître un certain nombre de conflits et d'incompréhensions quant à la génération et l'utilisation des modèles virtuels de la ville. Il s'avère donc nécessaire de proposer des solutions permettant de favoriser les échanges et le travail en communauté

¹ <https://earth.google.com/web/>

autour des mondes urbains afin d'éviter un repli sur soi des différents acteurs qui pourraient alors décider de se faciliter la tâche en adaptant les modèles afin de répondre à leurs besoins immédiats et ainsi compliquer tout futur travail commun. Une telle situation se révélerait souvent néfaste pour tous les acteurs utilisant les modèles virtuels de la ville puisque, étant un sujet intrinsèquement pluridisciplinaire, il fait intervenir un ensemble très varié de domaines scientifiques et techniques qui ont besoin les uns des autres. Chaque problématique peut ainsi faire intervenir plusieurs champs de connaissances et répondre correctement à celle-ci nécessite très souvent une compréhension globale de la ville qui reste inaccessible à un unique champ d'expertise. La complexité des sujets étudiés nécessite donc souvent une équipe pluridisciplinaire.

C'est notamment dans cette volonté de coproduire des travaux de recherche pluridisciplinaires autour de la ville qu'est né en 2011 le Laboratoire d'Excellence Intelligences des Mondes Urbains (LabEx IMU²), répondant au premier appel à projets « Laboratoire d'Excellence » du Programme Investissements d'Avenir. Le LabEx IMU regroupe plus de 500 chercheurs issus de 32 équipes et laboratoires de l'Université de Lyon – Saint Etienne, dans le but de produire de la recherche basée sur la pluralité scientifique apportée par les 29 disciplines représentées en son sein. En partenariat avec les collectivités et institutions territoriales ainsi que des entreprises et de pôles de compétitivité, le LabEx IMU développe des travaux de recherches prenant place au sein de cette intelligence collective autour de l'urbain. C'est dans ce contexte de pluridisciplinarité scientifique que s'est construite cette thèse. Les interactions avec des chercheurs de diverses disciplines au sein d'IMU ont ainsi permis de faire émerger des problématiques nécessitant des réflexions communes avec des géographes, des historiens ou des urbanistes par exemple.

De tels échanges ont également été réalisés tout au long de la thèse avec divers organismes comme des associations (Marmite Urbaine³, Green on the roof - Groof⁴), des instituts de recherche (European Institute for Energy Research⁵, Technische Universität München⁶) ou encore des institutions nationales (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement⁷, Bureau de Recherches Géologiques et Minières⁸). De

² <http://imu.universite-lyon.fr/>

³ <http://www.marmite-urbaine.com/>

⁴ <http://groof.fr/>

⁵ <https://www.eifer.kit.edu/>

⁶ <https://www.tum.de/>

⁷ <http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/>

⁸ <http://www.brgm.fr/>

nombreux échanges ont eu lieu également avec la Métropole de Lyon⁹, et notamment son service Direction Innovation Numérique et Systèmes d'Information.

La Métropole de Lyon fut l'une des premières collectivités territoriales au monde à proposer une modélisation 3D complète sur tout son territoire (plus de 550km² modélisés), respectant notamment le standard CityGML¹⁰ et accessible en données ouvertes¹¹ (avec presque 900 autres jeux de données de divers types). Leur maquette 3D fait ainsi l'objet de nombreuses études parmi les organismes internationaux recherchant des jeux de données complets et directement exploitables, ce qui fait de la Métropole de Lyon un interlocuteur très intéressant. Nos discussions ont notamment initié la mise en place de nouveaux services liés aux modèles 3D, ainsi que la création de données liées.

Toutes ces discussions et réflexions communes avec nos partenaires ont constitué des moments importants dans le déroulement de la thèse en initiant des travaux de recherche et en ouvrant des perspectives nouvelles pour d'autres. Ces échanges ont permis de réaliser que des sujets liés aux modèles virtuels de la ville correspondaient à des problématiques dans nos champs de recherche respectifs, ce qui a abouti à des réflexions communes permettant de comprendre les besoins et enjeux de chacun, et de proposer des solutions adaptées.

Ces études, améliorations et développements du modèle virtuel de la ville doivent également pouvoir profiter à l'ensemble des acteurs travaillant autour de ces données. Ce constat réalisé par de nombreux organismes a permis d'établir des besoins en termes d'interopérabilité des modèles virtuels. L'interopérabilité est « *la capacité d'un système, ou d'un composant d'un système, à accéder à une variété de ressources hétérogènes par le biais d'une unique interface ne nécessitant pas de changements pour être opérationnelle* » (Définition proposée par [Zha10]). Cela se traduit par le développement de standards internationaux qui permettent de définir des formats d'échanges des modèles virtuels centrés autour des besoins spécifiques liées aux informations de la ville. Le développement de ces standards, notamment au sein de l'Open Geospatial Consortium (OGC)¹², offre la possibilité aux acteurs locaux producteurs de données de créer des modèles virtuels de la ville qui pourront être lus, traités, et améliorés par de nombreux organismes partout dans le monde. Ceux-ci peuvent alors concevoir et

⁹ <https://www.grandlyon.com/>

¹⁰ <https://www.citygml.org/>

¹¹ <https://data.grandlyon.com/>

¹² <http://www.opengeospatial.org/>

développer des méthodes génériques¹³ sur de nombreux jeux de données de provenances diverses, mais également de produire des résultats interopérables pouvant être à leur tour exploités dans d'autres applications.

Ceci a été rendu possible grâce au développement de l'outil 3D-Urban Scene Editor (3D-Use) développé dans le cadre du projet VCity¹⁴ du laboratoire du LIRIS¹⁵. Le développement de cet outil, aujourd'hui disponible en open source¹⁶, a débuté en 2013 avec Maxime Morel, ingénieur sur le projet, et Gilles Gesquière. C'est une plateforme supportant les formats de fichiers et d'échange de données les plus répandus dans les Systèmes d'Information Géographiques (SIG). 3D-Use permet d'accéder au concept abstrait de modèle virtuel de la ville afin de le manipuler, l'étudier et de proposer de nouveaux algorithmes issus de la recherche, sans avoir à gérer les différents formats de fichiers en entrée et en sortie. Il est partagé avec des praticiens et chercheurs (d'IMU et d'ailleurs) qui peuvent s'en servir avec leurs données et pour développer leurs propres traitements en s'affranchissant des contraintes techniques nécessaires à la gestion des standards d'échange et à la visualisation des données qu'ils représentent.

Ainsi grâce à cet outil, bien que la plupart de nos traitements aient été développés avec les données de la Métropole de Lyon comme jeu de test, ils sont fonctionnels avec n'importe quel jeu de données (selon les éventuelles contraintes de modélisation). Ces méthodes sont utilisables directement si les jeux de données sont définis selon les standards déjà pris en charge par 3D-Use. Dans le cas contraire, il suffirait d'y implémenter la gestion du format concerné. La contrainte de standardisation des données fut par ailleurs initiatrice de nombreux échanges avec la Métropole de Lyon. Cela nous a permis de mieux comprendre leurs données et la manière dont elles sont générées, tout en leur proposant des remarques et propositions d'améliorations pour leurs modèles existants ainsi que pour la génération des futurs millésimes.

Bien que les méthodes d'acquisition des modèles 3D de la ville s'améliorent et permettent aujourd'hui de générer des maquettes très détaillées, la nécessité de couvrir des territoires de plus en plus étendus rend leur utilisation compliquée et limite la fréquence à laquelle ces acquisitions sont réalisées. Cela amène des contraintes liées à la qualité de ces données ainsi

¹³ « *En programmation, la généricité s'appuie sur l'idée d'abstraire des algorithmes concrets et efficace afin d'obtenir des algorithmes génériques pouvant être combinés avec différentes représentations de données et produire une grande variété de logiciels utiles* » (Définition extraite de [MS88]).

¹⁴ <http://liris.cnrs.fr/vcity>

¹⁵ <https://liris.cnrs.fr/>

¹⁶ <https://github.com/MEPP-team/3DUSE>

qu'à leur maintenance dans le temps. En effet, la ville évoluant constamment, il faudrait pouvoir réaliser des acquisitions précises et régulières afin de proposer une modélisation fiable et dynamique de la ville, ce qui n'est actuellement pas envisageable à cause du coût de réalisation de ces maquettes (coût financier, mais également en termes de temps de traitement dont une partie est encore souvent réalisée par des opérateurs humains).

Le matériel ainsi que les méthodes d'acquisitions et de traitement des données vont très certainement évoluer et les modèles générés seront géométriquement de plus en plus précis. Cependant, la géométrie seule ne suffit pas à représenter entièrement un espace urbain qui est défini par un ensemble d'informations inaccessibles aux seuls capteurs d'acquisition. Un modèle composé d'une géométrie seule a des applications limitées, comme servir d'outil de communication visuelle avec peu d'interaction avec l'utilisateur au-delà des déplacements. Il sera possible de générer des analyses exploitant cette géométrie, mais l'interprétation des résultats sera complexe et nécessitera quoi qu'il en soit de lier après coup ceux-ci avec des données sémantiquement riches pour permettre leur interprétation (par exemple, il est utile de savoir que des triangles sont au soleil à une certaine heure que si nous sommes capables d'identifier le bâtiment modélisé par ces triangles). La compréhension d'un territoire passe donc nécessairement par la sémantique de ses éléments qui permet de les définir de multiples façons en fonction de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Certains standards proposés par l'OGC, comme le CityGML [GKCN08], permettent ainsi de stocker tout un ensemble d'informations sémantiques pouvant concerner aussi bien la composition des éléments urbains (exemple : différencier le toit et les murs d'un bâtiment) que des informations annexes complétant leurs définitions (exemple : connaître la date de construction d'un bâtiment).

Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc développé une approche complémentaire aux processus d'acquisition initiaux. Elle consiste à agglomérer les données hétérogènes provenant de divers modèles virtuels de la ville afin de mettre en place un modèle virtuel 3D plus complet, notamment en termes de sémantique. En effet, un certain nombre d'informations pouvant être qualifiées de « manquantes » dans un modèle 3D sont accessibles dans des modèles déjà existants, pouvant cependant être représentés différemment. Il peut s'avérer néanmoins peu évident de mettre en relation des jeux de données hétérogènes (modèles 2D, 3D, orthophotographies, nuages de points, etc.) qui, même s'ils modélisent le même territoire, ont été générés de manières différentes et pour des besoins variés. De plus, chacun de ces modèles amène également ses éventuels biais et imprécisions qui complexifient leurs agrégations. Il est également nécessaire de produire en sortie des modèles pouvant

ensuite être utilisés par des acteurs extérieurs. Il est donc primordial de se baser sur des standards et d'exporter les résultats en respectant ceux-ci, quitte à les compléter s'ils ne permettent pas encore de représenter l'information nouvellement créée.

De plus, ces modèles 3D peuvent et doivent couvrir des territoires de plus en plus importants. Ceci est nécessaire pour proposer la maquette la plus complète possible permettant d'avoir une représentation virtuelle à très grande échelle, à l'image de l'outil Google Earth qui est aujourd'hui capable de proposer une représentation sur le globe entier (bien qu'elle ne soit pas encore homogène sur tous les territoires). Cela induit cependant une difficulté de gestion de ces données de plus en plus grande et nécessite de pouvoir exploiter efficacement cette imposante masse de données tout en permettant une gestion de la mémoire compatible avec nos ordinateurs. Il s'avère donc nécessaire de proposer des stratégies de gestion des modèles virtuels de la ville permettant un parcours efficace de leur territoire.

Nous pouvons ensuite nous intéresser à concevoir et mettre en place des outils d'analyse du territoire urbain qui nécessiteront une organisation efficace des données afin de pouvoir traiter de larges territoires. Ces outils pourront également profiter des améliorations amenées par le croisement de données hétérogènes pour générer des résultats plus complets. Nous nous intéressons particulièrement à la comparaison de modèles virtuels, potentiellement hétérogènes (exemple : comparer un modèle 3D avec un nuage de points 3D), acquis à des dates différentes afin d'automatiser la détection des changements apparus entre ces deux dates. Cela permet notamment de créer automatiquement des modèles temporels regroupant les informations de différentes acquisitions en les associant à des périodes d'existence, plutôt que d'avoir ces millésimes dans des modèles distincts et indépendants comme c'est généralement le cas pour le moment. Nous nous intéressons également aux analyses fournissant des indicateurs permettant la qualification d'un territoire par des praticiens, selon leurs besoins et les données disponibles, notamment en termes de visibilité ou d'ensoleillement et d'ombrage. Nous cherchons ainsi à mesurer l'impact de chaque élément urbain sur la qualité d'un point de vue donné, ainsi que son impact en termes d'ombres sur le territoire au cours d'une période temporelle, afin de permettre des analyses du territoire par des géographes ou des urbanistes par exemple.

Ces indicateurs doivent pouvoir traiter des territoires à grande échelle, prendre en compte aussi bien l'aspect géométrique que sémantique des objets de la ville, et être facilement assimilés, interprétés et reliés à des jeux de données externes permettant des analyses spécifiques en fonction des besoins de praticiens.

Tous les processus mis en place au cours de cette thèse n'ont pas pour vocation à être temps réel, ce sont des procédés lourds ne nécessitant normalement pas d'être lancés de nombreuses fois sur le même jeu de données. Aussi, bien que nous cherchons à rendre utilisables ces traitements grâce aux structures de données proposées qui permettant de gérer des territoires vastes avec des temps de calcul raisonnables, notre objectif n'est pas ici de les rendre le plus rapide possible et de nombreuses optimisations pourraient donc probablement être ajoutées à ceux-ci.

Ce manuscrit est organisé en 5 parties dont cette introduction est la première. Nous débutons dans la partie 2. par un état de l'art composé de deux chapitres, le premier s'intéressant aux travaux sur les modèles virtuels de la ville existants et sur leurs méthodes de génération, alors que le second présentera des méthodes d'analyse de ces modèles.

Nous présentons ensuite dans la partie 3. nos nouvelles méthodes d'enrichissement du modèle virtuel réparties en deux chapitres. Les modèles 3D de ville mis à disposition par des communes peuvent couvrir de très vastes territoires mais ne contiennent souvent que des terrains et des bâtiments, qui sont par ailleurs définis d'un point de vue essentiellement géométrique. Le chapitre 3.1 propose donc deux méthodes permettant d'améliorer ces modèles de ville. La première permet de lier les bâtiments d'un modèle 3D au cadastre qui contient des informations sémantiques afin de les lui assigner, tandis que la seconde propose une modélisation 3D de la canopée végétale de la ville à partir d'un croisement de données. Nous présentons ensuite dans le chapitre 3.2 trois structures de données permettant d'organiser selon différents critères les éléments d'un modèle virtuel 3D de ville afin de permettre sa manipulation sur de vastes territoires.

La partie 4. présente des méthodes mesurant le territoire qui profitent de ces enrichissements du modèle virtuel 3D de la ville. Ces méthodes sont ordonnées en deux chapitres. Les modèles 3D sont souvent organisés en millésimes indépendants correspondants aux différentes acquisitions effectuées par les communes. Le chapitre 4.1 met en avant des méthodes de comparaison permettant de mesurer l'évolution des bâtiments entre deux millésimes. Le chapitre 4.2 s'intéresse à mesurer l'ambiance de la ville, grâce à une méthode permettant de mesurer la composition d'un paysage et à une autre simulant l'ensoleillement au cours d'une période afin de quantifier l'impact en termes d'ombre de chaque élément de la ville sur le territoire.

Enfin, nous terminons dans la partie 5. par une conclusion présentant le bilan de tous ces travaux et des perspectives de recherche qui pourront y faire suite.

2. Etat de l'art

Les modèles virtuels 3D de ville se répandent depuis quelques décennies et de nombreux types d'applications les utilisent aujourd'hui dans des contextes différents, comme par exemple :

- Les jeux vidéo et les films dont l'histoire prend place dans un milieu urbain. [WMV⁺08] présente, entre autres, l'apport de modèles virtuels de villes générés procéduralement dans la série de jeux vidéo *Need For Speed* de *Electronic Arts*.
- Les serious games utilisés dans un cadre de formation pour fournir un entraînement à diverses professions qui doivent apprendre à connaître la ville et son territoire (comme dans l'exemple de simulation d'incendies proposé par [CWSC14]).
- Les systèmes de navigations et calculateurs de trajets qui utilisent une maquette 3D pour aider l'utilisateur à mieux appréhender son environnement (comme illustré par [CENCP12]).
- Les projets d'aménagement urbain nécessitent une visualisation 3D permettant d'analyser leurs implémentations dans l'environnement existant, et ainsi permettre de facilement comparer l'impact de projets concurrents (comme dans les travaux de [DNM09]).
- De nombreux outils de simulation nécessitent des modèles 3D pour produire des résultats plus précis : calcul d'ensoleillement, simulation de scénarios d'inondation ([SC09]), etc.

Il existe de nombreuses méthodes qui permettent de générer automatiquement de tels modèles 3D faisant intervenir des jeux variés de données, parmi lesquels nous pouvons notamment citer les photographies et les nuages de points, qu'ils soient aériens ou terrestres.

Nous allons débiter par présenter différentes méthodes permettant de générer des modèles virtuels de la ville, ou d'améliorer ceux déjà existant, avant d'introduire des travaux qui analysent ces modèles 3D pour produire des indicateurs sur la ville et ses éléments qui y sont représentés.

2.1 Multiplication des modèles virtuels 3D de la ville

Dans ce chapitre, nous allons présenter différentes méthodes permettant de générer des modèles virtuels de la ville, mais uniquement à partir de données réelles. Nous n'aborderons pas ici les méthodes de génération purement procédurale d'environnements urbains. Un état de l'art sur cette problématique a par ailleurs été réalisé il y a quelques années par [VAW+10] mais cela reste un sujet de recherche encore d'actualité, comme le montrent les travaux de [BLS16a].

2.1.1 Représentations virtuelles de la ville

Avant de présenter les modèles 3D utilisés pour représenter la ville et ses éléments, nous allons commencer par étudier les différents types de modèles virtuels qui existent, peu importe leurs types et leurs dimensions. Tous ces modèles sont importants car ils peuvent être liés à des modèles 3D à un moment donné : qu'ils soient utilisés pour les générer, les améliorer, ou en complément afin de fournir les informations nécessaires à la mise en place d'une analyse ou d'un traitement spécifique.

2.1.1.1 Données géographiques

Les données géographiques présentes dans les modèles virtuels de la ville possèdent trois différents niveaux de description. Le premier est la géométrie qui permet de décrire la forme et la localisation d'un objet (dans un système de coordonnées géographiques). Le second niveau concerne la sémantique de l'objet. Elle est composée d'informations permettant de le caractériser via des données attributaires (exemple : nom, type, date de construction, etc.). Le troisième et dernier niveau est la topologie qui décrit les relations de l'objet avec ses voisins.

Les géométries doivent être définies dans un système de coordonnées géographiques afin de permettre leur localisation et leur mise en relation avec d'autres données [Cha06]. L'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG)¹⁷ définit ceci de la manière suivante¹⁸ : « *La*

¹⁷ <http://www.ensg.eu/>

¹⁸

<http://seig.ensg.ign.fr/fichchap.php?NOFICHE=FP53&NOCONT=&NOCHEM=CHEMS007&NOLISTE=2&N=6&RPHP=&RCO=&RCH=&RF=&RPF=>

détermination de points nécessite l'utilisation d'une surface de référence mathématiquement simple qui représente le mieux possible la forme de la Terre. Cette surface est l'ellipsoïde de révolution qui est une sphère aplatie aux pôles. [...] Les coordonnées géographiques d'un point M de la surface de la Terre sont la longitude λ et la latitude φ de la projection de M sur l'ellipsoïde suivant la normale et la distance algébrique h de M_0 à M .

L'utilisation de coordonnées sur une surface de référence comme un ellipsoïde n'est pas aisée et ne permet pas de réaliser directement des mesures de distance, d'angle ou de surface. De plus, les cartographes désirent avoir une image graphique du monde sur un plan.

C'est pour cela que l'on représente l'ellipsoïde ou un morceau de celui-ci sur un plan ; c'est ce qu'on appelle une représentation plane ou projection.

Les coordonnées en projection de M sont les coordonnées cartésiennes (E,N) du point m , image de M dans le plan projection muni d'un repère orthonormé $(O;e,n)$. La projection cartographique est définie par la donnée de deux fonctions f et g telles que :

$$E = f(\lambda, \varphi) \text{ et } N = g(\lambda, \varphi).$$

Toutes les projections entraînent des déformations ; selon les propriétés des deux fonctions f et g , certaines conserveront les angles et d'autres conserveront les surfaces. Les distances ne sont jamais conservées. »

Les notations introduites dans ces définitions sont représentées Figure 1 qui est issue de la même source.

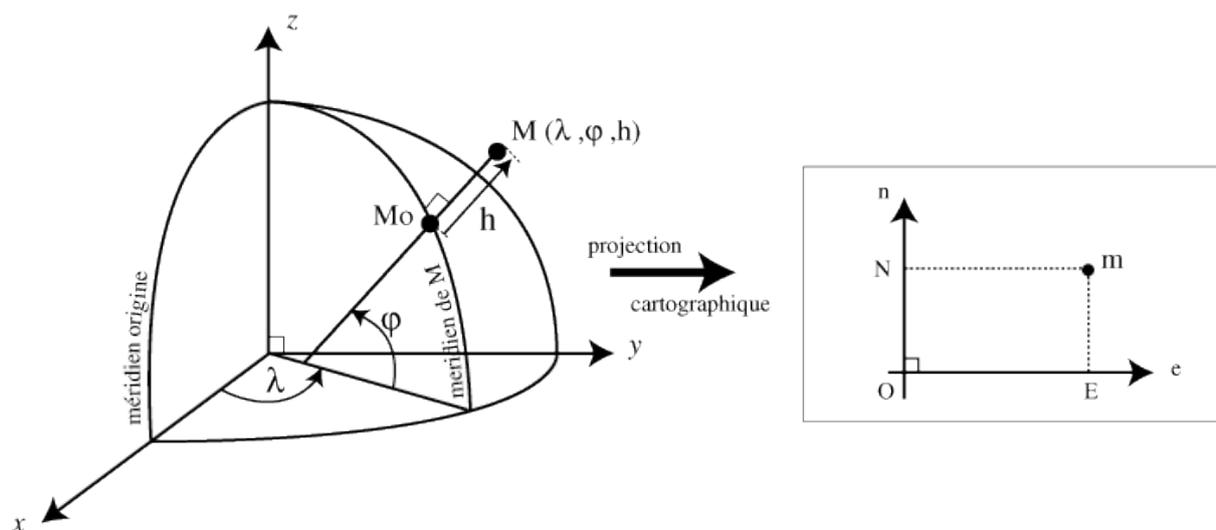


Figure 1: Coordonnées géographiques et projection planaire. (Image extraite du site de l'ENSG¹⁸)

Nous devons également différencier deux types de données concernant la géométrie : rasters et vectorielles. Les premières correspondent à une matrice de cellules (ou pixels dans le cadre

de données 2D), contenant chacune une information, qui discrétisent l'espace étudié. Cela correspond généralement à des images ou des cartes numérisées qui sont souvent définies localement mais qui peuvent également être géoréférencées dans un système de projection. Les données vectorielles utilisent le concept d'objets géométriques (points, lignes, polygones) pour représenter des entités géographiques. Ce format facilite la manipulation des objets et permet notamment de stocker plus facilement des informations sémantiques liées à chaque élément. La Figure 2 illustre la différence entre ces deux formats de données.

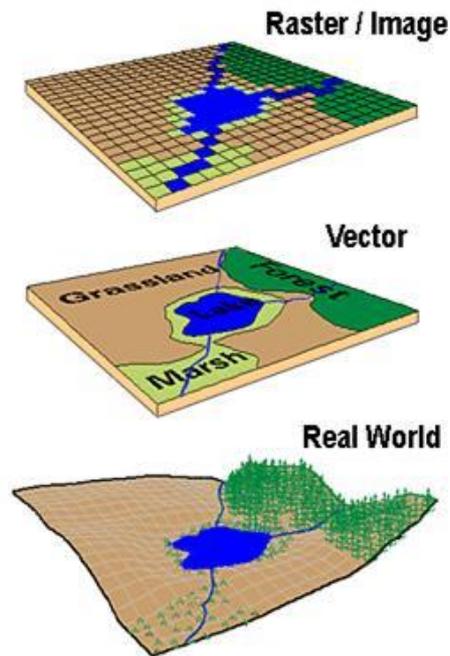


Figure 2 : Données raster et vectorielles. (Image extraite du site de David J. Buckley¹⁹)

2.1.1.2 Photographies

Le type de données le plus répandu permettant de représenter la ville et qui est accessible à tout le monde est la photographie : toute photographie prise en milieu urbain représente une capture de la ville. S'il est possible d'extraire des informations à partir d'un ensemble quelconque de photographies, nous nous intéressons ici principalement à celles qui ont été acquises dans le but spécifique de représenter la ville.

Cela peut concerner une capture à petit échelle, comme par exemple pour photographier la façade d'un bâtiment afin d'appliquer une texture à un modèle 3D correspondant, ou à plus grande échelle comme les campagnes d'acquisition aériennes permettant notamment de générer des orthophotographies et des modèles 3D par photogrammétrie.

¹⁹ http://planet.botany.uwc.ac.za/nisl/GIS/GIS_primer/page_15.htm

Les orthophotographies correspondent à des images aériennes redressées et géoréférencées afin que chaque point soit superposable à une carte plane, ce qui donne l'impression que ces images ont été prises à la verticale en chaque point. Les prises de vues peuvent être réalisées en couleur mais également en infrarouge, comme illustré dans la Figure 3.

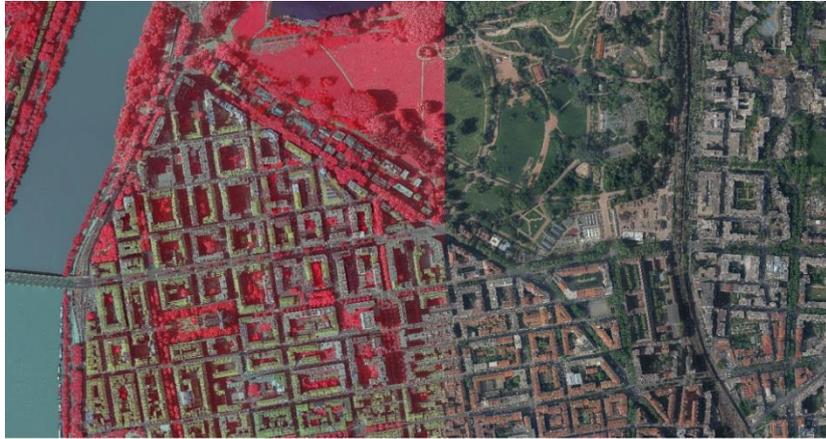


Figure 3 : Orthophotographies du 6ème arrondissement de la ville de Lyon. A gauche en infrarouge (l'image est constituée de trois canaux capturés lors de l'acquisition : infrarouge, rouge, vert), et à droite en couleurs (l'image est constituée de trois canaux : rouge, vert, bleu). (Données issues du site de la Métropole de Lyon²⁰)

2.1.1.3 Cartes vectorielles 2D

Il existe de nombreux jeux de données vectoriels 2D décrivant les territoires urbains. Les objets géométriques (points, lignes et polygones) peuvent représenter tout un ensemble d'objets variés en les localisant, en leur donnant une forme 2D plus ou moins précise et en stockant de la sémantique associée à chaque objet. La facilité d'utilisation et de lecture de ces données permet notamment une association facile de plusieurs d'entre elles, comme illustré par la Figure 4 qui représente 3 jeux de données distincts contenant les emprises des sols des bâtiments (polygones en rouge), les routes (lignes en gris) et les arbres d'alignement (points en vert) sur une section du 3^{ème} arrondissement de la ville de Lyon. Notons que les polygones peuvent avoir des formes quelconques (non convexes) et posséder des trous, mais doivent être fermés. Chaque élément vectoriel contient également un ensemble d'informations sémantiques.

2.1.1.4 Nuages de points 3D

Le nuage de point 3D est un ensemble de points dans un système de coordonnées à trois dimensions qui peuvent représenter les surfaces des objets ([KB04], [OGW+13]). En fonction

²⁰ <https://data.grandlyon.com/imagerie/orthophotographie-2015-du-grand-lyon/>

des méthodes d'acquisition utilisés, ces points peuvent éventuellement contenir un ensemble d'informations (exemple : couleur ou matériau de l'objet en ce point).

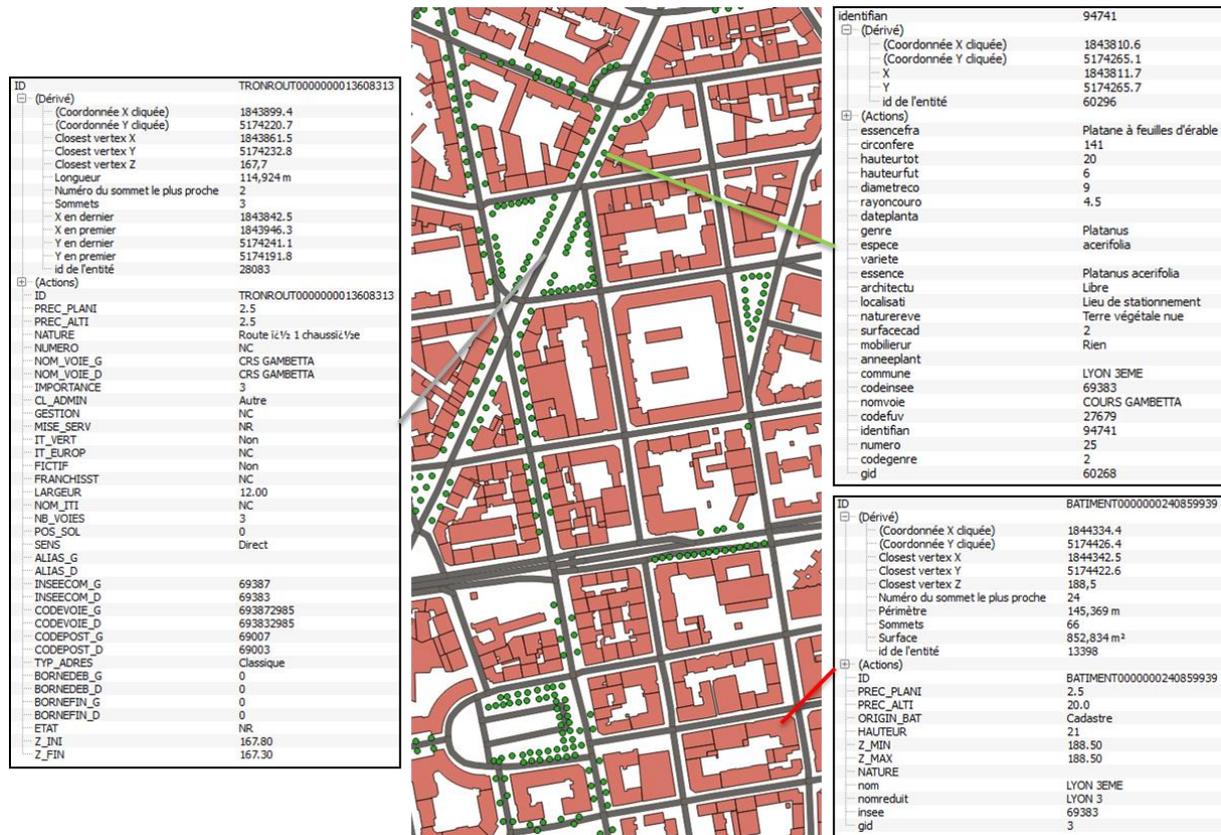


Figure 4 : Données vectorielles 2D représentant les bâtiments, les routes et les arbres d'alignement. Chaque objet est lié à un ensemble d'informations sémantiques. (Données des routes et des bâtiments extraites d'OpenStreetMap²¹, données des arbres d'alignement extraites du site de la Métropole de Lyon²²)

Les nuages des points les plus utilisés dans le cadre de modèles virtuels de la ville sont ceux issus de LiDAR (Light Detection And Ranging), comme celui illustré dans la Figure 5. Le LiDAR est un capteur optique actif qui émet des faisceaux laser afin d'en mesurer la réflexion. Les rayons sont captés et analysés par des récepteurs placés dans le capteur LiDAR, qui mesurent notamment la période écoulée entre l'impulsion du laser et la réception de sa réflexion afin de mesurer précisément la distance entre le capteur et la cible. Associée aux informations de positionnement du capteur, cette mesure permet de localiser en 3D les points d'intersection entre le rayon et l'objet ciblé et ainsi échantillonner sa surface grâce à la multitude de rayons émis dans diverses directions ou depuis différentes positions. Les acquisitions peuvent se faire au niveau du sol, nous parlons alors de LiDAR terrestre, mais également depuis un appareil en vol (drone, hélicoptère, etc.), ce qui génère alors des LiDAR aériens.

²¹ <https://www.openstreetmap.org/>

²² <https://data.grandlyon.com/environnement/arbre-dalignement/>

En fonction du capteur utilisé, plusieurs informations peuvent également être enregistrées pour chaque point détecté. Les impulsions laser émises par un LiDAR ne se reflètent pas de la même façon en fonction de l'objet intersecté, et il est ainsi possible pour un seul rayon généré de correspondre à plusieurs retours à partir du moment où le rayon n'est pas entièrement réfléchi à cause du matériau intersecté. Si une surface solide telle que le sol ou la façade d'un bâtiment générera un unique retour, les arbres par exemple pourront en générer plusieurs. Le premier retour correspondra alors à la cime de cet arbre, alors que le dernier pourra correspondre au sol en dessous ou à une branche épaisse. Les points d'une acquisition LiDAR peuvent ainsi contenir cette information qui permettra notamment en post traitement d'aider à leur classification. Chaque retour peut également contenir une valeur d'intensité permettant de mesurer la force de retour de l'impulsion laser, ce qui aidera également à la caractérisation de l'objet correspondant au point d'intersection.



Figure 5 : Nuage de points LiDAR aérien du 6^{ème} arrondissement de la ville de Lyon acquis en 2015 avec une densité de 12 points/m². Les différentes couleurs (arbitrairement définies ici) correspondent aux classifications des points présentes dans le LiDAR. Par exemple, la végétation est ici en jaune alors que les surfaces artificielles sont en orange. (Données issues du site de la Métropole de Lyon²³)

2.1.1.5 Maillages 3D

Le maillage polygonal est une représentation très répandue pour des représentations surfaciques d'objets 3D. Il est défini par un ensemble de sommets et de polygones qui les

²³ <https://data.grandlyon.com/imagerie/points-lidar-2015-du-grand-lyon/>

relient entre eux afin de former la surface d'un objet (Figure 6). Des textures peuvent facilement être associées à ces polygones.

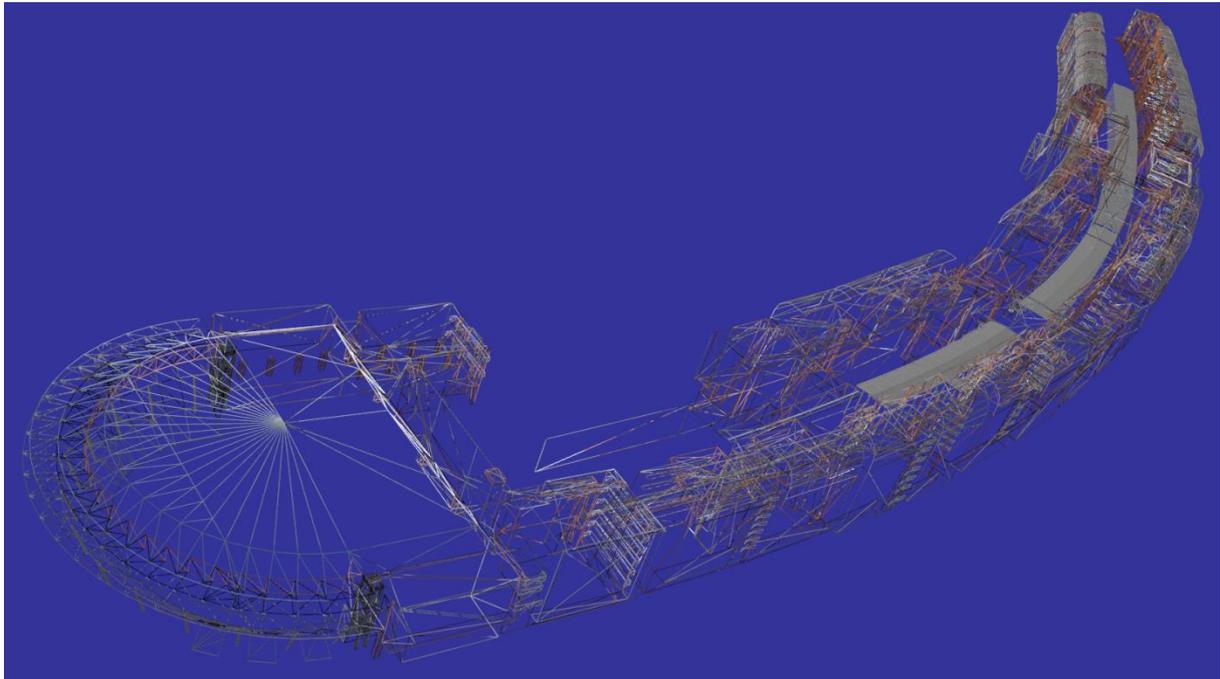


Figure 6 : Maillage polygonal de la Cité Internationale dans le 6^{ème} arrondissement de la ville de Lyon. (Données issues du site de la Métropole de Lyon²⁴)

Les maillages peuvent être composés de polygones quelconques, notamment dans le cas des bâtiments composés de nombreuses surfaces planes pouvant être modélisées via un unique polygone. Cela peut s'avérer utile pour certains traitements qui peuvent ainsi traiter directement façade par façade sans avoir à parcourir une liste de petits polygones subdivisant la surface plane qui alourdissent le modèle.

De tels maillages sont cependant souvent composés de triangles et cela peut d'ailleurs constituer une condition pour le bon fonctionnement de certains traitements qui reposent sur les particularités géométriques d'un triangle, notamment sa convexité.

La présence de triangles ou de polygones quelconques dépend du modèle initial mais les deux manières de faire respectent les standards tels que les CityGML, ce qui signifie qu'il faut être capable de les gérer. Des organisations comme SIG3D²⁵ travaillent actuellement sur des recommandations d'écriture des données afin d'éviter cette hétérogénéité des modèles pour un même standard. Actuellement, le type de maillage choisi varie d'un jeu de données à l'autre mais cette différence peut cependant être facilement contournée puisqu'il est possible de passer d'une description géométrique à une autre : un seul polygone concave peut être

²⁴ <https://data.grandlyon.com/localisation/maquette-3d-texturfe-de-larrondissement-de-lyon-6f-la-mftropole-de-lyon/>

²⁵ <http://www.sig3d.org/>

partitionné en triangles et un ensemble de triangles peuvent être unis en un seul polygone. La création de maillage triangulaire est en effet une problématique maîtrisée et de nombreuses méthodes existent afin de trianguler des modèles 3D. Celles-ci se basent souvent sur la triangulation de Delaunay, comme par exemple dans les travaux de [WH94]. Les maillages 3D de terrains sont un peu particuliers puisqu'ils sont très souvent modélisés par des Triangulated Irregular Network (TIN) constitués d'un ensemble de triangles irréguliers sans recouvrement, qui sont plus considérés comme une modélisation 2.5D qu'une vraie 3D (pour un (x,y) donné, il ne peut y avoir qu'une seule valeur de z). Nous appelons ceci un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

2.1.1.6 Autres modélisations 3D

Il existe d'autres structures permettant de modéliser des objets en 3D ([CF01], [TV04]), parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Les surfaces paramétriques est une technique de modélisation des surfaces d'un objet 3D dans laquelle les surfaces sont définies par des équations paramétriques ([BLG00]). Elle est utilisée, entre autres, par le logiciel de modélisation 3D Rhino3D.²⁶
- Les surfaces implicites est une autre méthode de modélisation surfacique ([TO02], [CCG+06]). Soit F une fonction de \mathbb{R}^3 dans \mathbb{R} , une surface implicite est définie par l'ensemble des points $P(x,y,z)$ tels que $F(x,y,z) = 0$ (exemple d'une sphère de rayon R : $F(x,y,z) = x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$). Cette modélisation permet notamment de gérer facilement l'agrégation de plusieurs objets 3D en créant des frontières continues. Elle est notamment utilisée par la suite GDM²⁷ du BRGM qui s'intéresse à la modélisation des données géologiques.
- La modélisation volumique par voxels correspond au format raster précédemment présenté appliqué à l'espace 3D. Cet espace est partitionné selon une grille régulière où chaque cellule, appelée voxel, contient une information. Cette modélisation est encore peu utilisée dans le cadre de modèles virtuels de la ville car les représentations sont soit simplistes, soit très lourdes à manipuler. Cependant, des travaux comme ceux de [NGZ+16] commencent à s'y intéresser en proposant des méthodes de génération

²⁶ <https://rhino3d.abvent.com/>

²⁷ <http://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/gdm-suite-gerer-modeliser-visualiser-donnees>

de modèles volumiques à partir de nuages de points ou des maillages surfaciques traditionnels. La modélisation par voxels est par exemple utilisée par le logiciel de modélisation Qubicle²⁸.

2.1.1.7 Niveaux de détails de modèles 3D

Les modèles 3D de scènes complexes (urbaines ou autres) sont difficiles à manipuler et nécessitent des stratégies d'utilisation afin de pouvoir les gérer sur des machines de puissances inégales.

Une des notions les plus importantes concerne le niveau de détail d'un objet 3D [Lue03]. Puisque tous les éléments d'une scène n'ont pas forcément la même importance (en fonction par exemple de leurs types, de leurs paramètres ou de leurs distances à la caméra), il est possible de faciliter la manipulation de cette scène en utilisant des modèles simplifiés des objets de moindre importance. Cela nécessite donc d'avoir différentes versions de ces objets, différents niveaux de détails, ou Level of Details (LoD), qui représentent le même élément de manière plus ou moins fidèle. Ces différences peuvent concerner la géométrie (par exemple : avoir moins de polygones) mais également la sémantique (par exemple : agréger les fenêtres d'un bâtiment aux murs).

Si la plupart des modèles urbains actuels sont définis selon un unique niveau de détail, il est possible dans les standards actuels d'en stocker plusieurs afin de permettre une adaptabilité du modèle en fonction des besoins. C'est notamment dans ce but que [BLS15] proposent une méthode permettant de gérer plus efficacement les modèles de ville constitués de plusieurs LoDs en détectant et retirant les informations redondantes que l'on peut retrouver dans différents niveaux de détails.

Des méthodes de génération de modèles 3D directement en plusieurs LoDs sont rares (car peu d'applications ont en besoin pour l'instant) mais existent, comme celle de [AEH+08] utilisant des données LiDAR afin de générer des bâtiments en 3D selon les 3 premiers niveaux de détails défini par le standard CityGML pour les bâtiments. [VLA15] sont eux allés plus loin en proposant une modélisation automatique des 4 premiers niveaux de détails de bâtiments de ce standard, à partir de maillages 3D bruts issus d'un traitement par stéréovision d'un ensemble d'images. Le modèle virtuel 3D ainsi créé comporte également le terrain ainsi que des arbres (Figure 7).

²⁸ <http://www.minddesk.com/index.php>

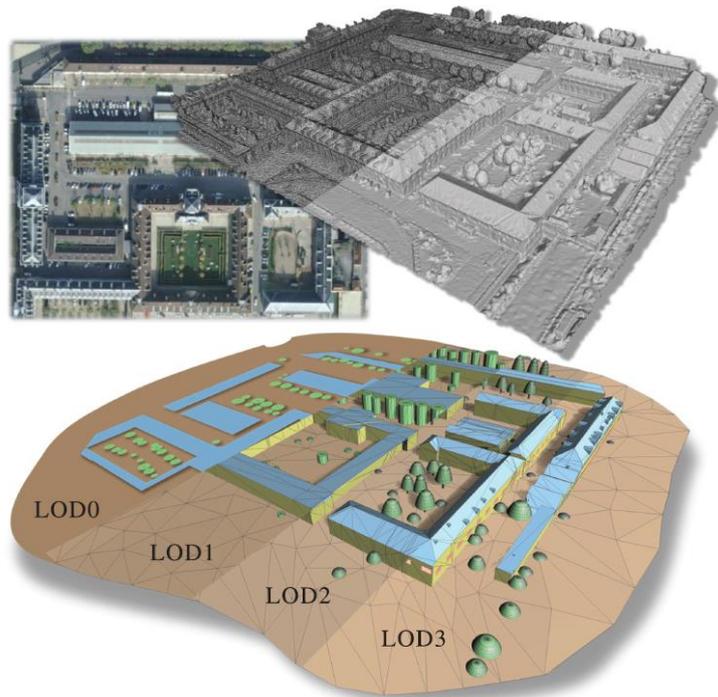


Figure 7 : En haut : maillage 3D brut généré par stéréo vision. En bas : modèle virtuel 3D de la ville post traité et composé du terrain, d'arbres, et de bâtiments pouvant être représentés selon les 4 premiers LoDs du standard CityGML. (Image extraite de [VLA15])

Cette définition de niveaux de détails pour les différents éléments que l'on peut retrouver dans un modèle virtuel de la ville ainsi que leurs utilisations font par ailleurs l'objet de nombreux travaux de recherche. Il est notamment possible de trouver des travaux dont le but est d'élaborer des méthodes permettant de généraliser les modèles 3D afin de simplifier le modèle virtuel de la ville et ainsi faciliter son utilisation ([Kad06], [MF07], [FMJ09]).

[BLSV16] et [BLS17] s'intéressent plutôt à mesurer l'impact de ces niveaux de détails sur des résultats d'analyses spatiales sur les modèles 3D de la ville, comme sur une méthode permettant de mesurer les ombres par exemple. Ils en sont arrivés à la conclusion que vouloir générer et utiliser le plus haut niveau de détail disponible n'était pas forcément toujours justifié dans des cadres applicatifs où la précision des résultats doit également faire face à des contraintes en termes de temps de calcul.

Ces différents niveaux de détail représentent finalement des représentations diverses de la ville, et peuvent également être amenés par des usages spécifiques. Par exemple, une simulation d'inondation aura besoin d'une modélisation fine au niveau du sol, mais pourra se contenter d'une représentation simplifiée des toits de bâtiments. Il sera alors nécessaire de pouvoir proposer un modèle 3D adapté aux contraintes amené par ces usages.

2.1.1.8 Organisation des objets d'un modèle urbain

Il est également possible de s'intéresser aux niveaux de détails à l'échelle de la ville elle-même. En effet, en termes de structure sémantique d'un modèle urbain, il n'existe souvent aucun objet entre la ville et ses objets tels que les bâtiments. Cependant, le parcours du modèle virtuel de la ville peut difficilement s'effectuer avec une telle différence d'échelle entre deux niveaux sémantiques. Cela signifie que l'objet ville est directement composé de plusieurs milliers d'objets non ordonnés ce qui ne facilite pas son parcours et sa manipulation (à gauche de la Figure 8). Il serait préférable de posséder des niveaux intermédiaires correspondants par exemple aux arrondissements, aux quartiers, aux îlots routiers, ... Ainsi, le parcours du territoire urbain se fera de manière plus naturelle en s'orientant rapidement vers les zones et les objets urbains désirés sans avoir besoin de mettre en place de structures accélératrices particulières (à droite de la Figure 8).

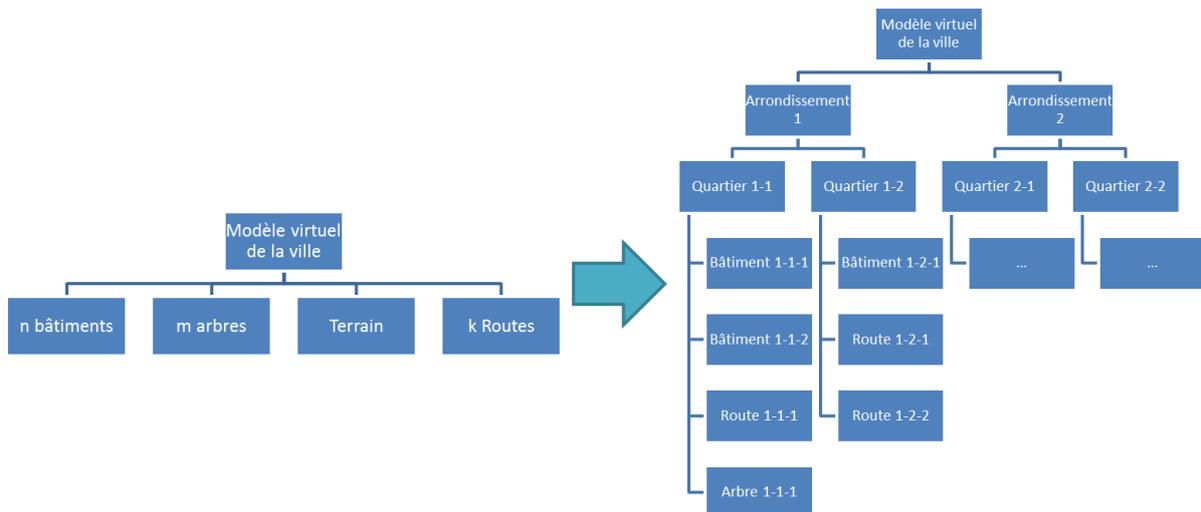


Figure 8: Ajout de plusieurs niveaux intermédiaires à la structure sémantique d'un modèle virtuel de ville.

C'est pour cette raison que des travaux de recherche ont également été menés afin de générer des niveaux de détail de la ville dans sa globalité [He12]. L'idée est de partitionner le territoire urbain en différents niveaux permettant de générer des niveaux intermédiaires dans le modèle virtuel entre la ville et les bâtiments par exemple. Le partitionnement d'une scène 3D complexe est une problématique bien connue dans le domaine de l'informatique graphique, puisque certains algorithmes comme ceux basés sur les lancers de rayons nécessitent une gestion efficace de la scène afin de pouvoir la traiter avec des temps de calcul raisonnables [KK86]. [SFD09] répondent notamment à ce problème en définissant une structure accélératrice basée sur le principe d'une hiérarchie de boîtes englobantes (BVH : Bounding Volume Hierarchies) utilisée afin de partitionner efficacement la scène 3D. Chaque

géométrie possède une boîte englobante, et les objets proches sont regroupés de manière récursive afin de former des boîtes englobantes de plus en plus volumineuses qui partitionnent de plus en plus grossièrement la scène. Ainsi, le parcours de cette scène lors d'un traitement peut se faire récursivement en partant des plus grosses boîtes englobantes et en testant ses enfants uniquement si elles vérifient une condition particulière. Cela permet de parvenir rapidement jusqu'aux objets concernés par le traitement sans avoir eu besoin de tester toutes leurs géométries. Par exemple, [GLM96] et [KHM+98] proposent des Bounding Volume Hierarchies dans le but de faciliter la détection d'intersections entre différents objets d'une scène 3D. Une BVH simple est représentée Figure 9.

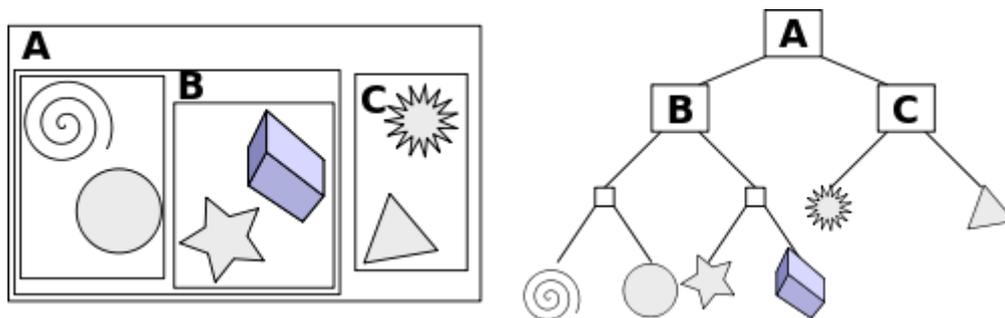


Figure 9: Bounding Volume Hierarchy simple à droite de la scène à gauche contenant 6 objets. (Image extraite de Wikipédia²⁹)

Ces types de solutions ont pour applications directes des outils de visualisation de modèles 3D de la ville qui ont besoin d'une stratégie efficace d'affichage des données puisqu'ils ne peuvent pas se permettre de charger entièrement un modèle 3D de ville pouvant s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres. C'est par exemple le cas de [Mao11] qui propose un ensemble de méthodes permettant d'agréger et généraliser les éléments d'un modèle 3D de la ville afin de permettre sa visualisation dans un outil web basé sur Web-based Graphics Library (WebGL³⁰). Il présente notamment la structure CityTree qui permet d'agréger des groupes de bâtiments afin de générer des blocs urbains simplifiés et donc rapides à charger. Ces agglomérations et généralisations des éléments urbains permettent ainsi de générer différents niveaux de détails du modèle 3D de la ville et fournit, par exemple, à un outil de visualisation la possibilité de ne charger les modèles les plus précis que pour certains objets dans des circonstances prédéfinies.

[GD09] proposent une autre interprétation de ces outils de généralisation et d'agrégation des objets urbains. L'objectif n'est ici pas d'optimiser la visualisation mais d'améliorer la compréhension d'une carte 3D en fonction de la position de l'utilisateur en faisant ressortir les

²⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Bounding_volume_hierarchy

³⁰ <https://www.khronos.org/webgl/>

éléments considérés comme importants et en simplifiant ceux qui ne le sont pas (Figure 10). Les différents niveaux de détails y sont appelés niveaux d'abstraction (LoA : Level of Abstraction) puisqu'ils permettent une visualisation abstraite de la ville.

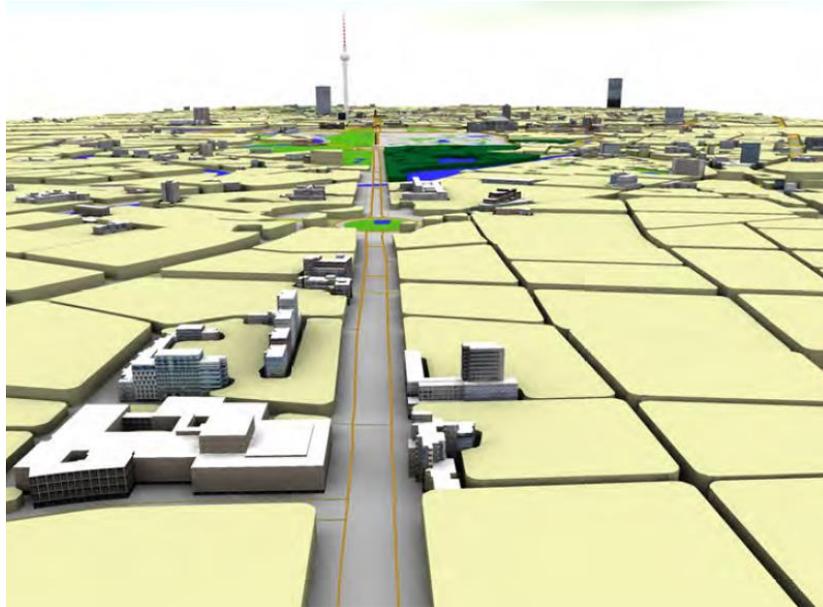


Figure 10 : Visualisation abstraite d'un modèle 3D de ville. Les bâtiments importants et la végétation ressortent alors que les bâtiments non importants sont simplifiés afin de faciliter la visualisation. (Image extraite de [GD09])

L'agrégation de bâtiments en un ensemble de blocs (ou îlots) urbains se fait souvent grâce à l'utilisation des routes. En effet, le réseau routier forme une découpe structurante de la ville et de ses éléments et il peut donc être facilement exploité afin de générer différents niveaux de partitionnement d'un territoire, comme le proposent [CBZ+08].

Il est cependant nécessaire de mettre en place une hiérarchie de routes afin de proposer différents niveaux d'abstraction et ainsi créer également une hiérarchie d'îlots. Plusieurs méthodes existent afin de déterminer quelles sont les routes à conserver ou éliminer selon le niveau désiré, comme par exemple celles de [TWC08], [CHL+09], [LZ12] ou encore [ŠMO16].

2.1.2 Modèles virtuels 3D de la ville disponibles

De nombreuses villes proposent aujourd'hui une maquette virtuelle 3D représentant leur territoire, dont la plupart ont été mises en place dans les vingt dernières années. [BCE+00] avait ainsi répertorié 63 « applications sérieuses » de telles maquettes en 2000 (dont 38 qui concernent des villes de plus d'un million d'habitants), alors que [Mor13a] en dénombrait plus de 1200 en 2013. La Figure 11 représente la cartographie des modèles virtuels 3D de villes répertoriés par [Mor13b].



Figure 11 : Cartographie des modèles virtuels 3D de la ville dans le monde. (Image extraite de [Mor13b])

Nous pouvons notamment citer le projet Virtual Kyoto qui modélise en 4D (3D + la dimension temporelle) la ville de Kyoto ([YNI07], [YNI+08], [NYI+10]). Cette modélisation couvre une période partant de la ville actuelle et remonte jusqu'à l'ère Heian au 8^{ème} siècle grâce un ensemble d'archives permettant de générer une modélisation 3D des bâtiments au cours des époques.

Un autre projet d'envergure concerne la ville de New York et les travaux de [KBC15] qui ont proposé une modélisation 3D sémantiquement très précise de plus de 1000km² de territoire appartenant à cette ville. Ce modèle a nécessité 26 jeux de données différents pour générer les bâtiments, les parcelles, les routes, les parcs, le terrain ainsi que les étendues d'eau.

Enfin, nous pouvons présenter les modèles proposés par la Métropole de Lyon sur l'ensemble de son territoire qui s'étend sur plus de 550km². Ces modèles 3D ont été générés par photogrammétrie. Ils sont constitués de bâtiments (ainsi que de bâtiments remarquables plus fidèlement représentés), du terrain, des cours d'eau, des ponts, et de divers objets présents dans le territoire urbain (comme des fontaines par exemple). De plus, ces données ont été générées pour trois millésimes : 2009, 2012 et 2015 ; ce qui permet de garder une trace de l'évolution du territoire au cours du temps, même si celle-ci n'est pas correctement exploitée comme nous le verrons par la suite. Nous illustrerons tous nos travaux sur des données issues des ressources de la Métropole de Lyon. D'après les informations disponibles sur leur banque de données, les modèles 3D contenus dans les CityGML ont une précision métrique et le cadastre est précis à environ 10cm près. Les orthophotographies ont des pixels de 0.08m pour les données de 2015, 0.1m pour 2012 et 0.16m pour 2009 (voir Figure 12). Concernant les nuages de points LiDAR, ils ont une précision en z de +/- 0.15m et ont une densité de 12

points/m² pour les données de 2015 et de 6 points/m² pour 2012 (l'information est absente pour 2009).

	Ortho 2009	Ortho 2012	Ortho 2015
Type	Numérique	Numérique	Numérique
Prestataire	Eurosense	Eurosense	Aeroscan (ss traitant IMAO et CICADE)
Date de la prise de vue	14 au 16 Août 2009	26 au 31 Mars 2012	7,8,10,11 et 12 Mai 2015
Superficie	1200 km ²	1300 km ²	1399 km ²
Échelle	1/21 900e	1/14 000e	1/12 500e
Altitude de vol	2200 m	1640 m	1 500 m
Nombre de clichés	3558	8918	11922
Caméra	Vexcel Ultracam X	Vexcel Ultracam XP	Vexcel Ultracam XP
Focale	100,5 mm	100,5 mm	100,5 mm
Pixel	16 cm	10 cm	8 cm
Précision	30 cm	30 cm	16 cm
Version Infra-rouge ?	Oui	Oui	Oui

Figure 12 : Orthophotographies générées pour la Métropole de Lyon. (Image extraite de la documentation accessible sur le site de la Métropole de Lyon³¹.)

2.1.3 Méthodes de création et d'amélioration de ces modèles 3D

Bien que les travaux de cette thèse ne portent pas sur la génération de modèles 3D à partir de données brutes, il est important de connaître les procédés permettant de produire de telles méthodes puisqu'elles ont une influence certaine sur la manière dont sont modélisés les objets urbains. Il est donc nécessaire de comprendre comment fonctionne les différentes méthodes de création de ces modèles 3D de ville afin de mieux appréhender leur utilisation.

La plupart des méthodes automatiques de génération de modèles virtuels 3D de la ville utilisent comme données de base des images ou des nuages de points issus de LiDAR, voire parfois les deux ensembles ([HK10], [MWA+13]). Ces deux types de données peuvent être acquises de diverses manières mais nous pouvons déjà les classer en deux catégories : terrestres et aériennes. Les données terrestres sont souvent utilisées à plus petite échelle que les données aériennes, mais la génération d'un modèle complet nécessitera souvent l'utilisation des deux types puisque certaines informations ne sont accessibles que par l'une ou l'autre (ex : les toits seront absents des données terrestres alors que les rues étroites seront très grossièrement modélisées depuis des données aériennes).

³¹ <https://data.grandlyon.com/imagerie/orthophotographie-2015-du-grand-lyon/>

2.1.3.1 Méthodes exploitant des images

Les images sont traditionnellement les données les plus facile à acquérir, et donc les plus répandues. Elles peuvent être utilisées afin de générer des maquettes 3D grâce aux méthodes de photogrammétrie qui font l'objet de nombreuses recherches depuis plusieurs décennies comme le montrent les travaux de [STH80], [WD00], [KAC07] ou encore [PKK+17]. La Figure 13 illustre un modèle 3D dont les géométries de bâtiments ont été obtenues avec une telle méthode.

Des procédés ont été développés afin de générer des modèles 3D à partir de simples images prises par exemple sur internet [SSS06], [SSS08], [SSN09], [AFS+11]). Mais cela nécessite des algorithmes lourds nécessitant un nombre élevé de photographies et leur utilisation reste souvent limitée à des monuments particuliers. La génération d'une maquette de ville entière à grande échelle nécessitera donc souvent l'utilisation de photographies aériennes acquises dans ce but. [BZ99], [JRH03] et [KN04] proposent notamment des méthodes de reconstruction 3D de bâtiment à partir de photographies aériennes.



Figure 13 : Reconstruction 3D de la ville de Xanthi (Grèce) par photogrammétrie. (Image extraite de [KAC07])

Ces modélisations concernent cependant uniquement les toits et bien que la reconstruction de ceux-ci semble robuste et fonctionnelle, les toits seuls ne suffisent pas à générer un modèle de ville suffisamment précis. Il est à noter que [BZ99] ont néanmoins appliqué avec succès leur méthode de modélisation 3D sur des photographies d'intérieur de bâtiments pour générer une géométrie 3D (simple) de ceux-ci.

[FZ03] proposent une méthode automatique de création de modèles urbain 3D texturé, composé du terrain et des bâtiments, utilisant un mélange de photographies aériennes et

terrestres afin de proposer une navigation visuellement satisfaisante aussi bien dans les airs qu'au niveau du sol, ce qui est une amélioration par rapport aux modélisations basées sur le toit.

[LHN00] ont développé un procédé interactif permettant de générer des modèles 3D de bâtiments plus justes à partir de photographies aériennes grâce à l'intervention d'un utilisateur. Bien que ces interventions soient réduites au minimum, elles semblent apporter une meilleure gestion de cas complexes habituellement mal traités par des méthodes entièrement automatiques. Ils ont également proposé des améliorations à cette méthode afin de générer des modèles plus précis des bâtiments au niveau du sol grâce notamment à l'utilisation d'images terrestres ([LJN02a], [LJN02b], [LJN02c]).

En plus des bâtiments et du terrain, il est également possible d'extraire des données depuis des photographies aériennes permettant de générer des modélisations 3D de la végétation, comme le montrent les travaux de [IBC08] et [ICG+14]. Les arbres sont générés avec une information de hauteur et du diamètre de la couronne, mais leur modélisation se limite à l'utilisation d'une représentation par billboards (une image 2D d'un arbre qui se positionne en fonction de la caméra afin de donner l'impression de volume). Cela peut s'avérer insuffisant pour des traitements nécessitant un réel volume modélisant la végétation et notamment la canopée des arbres. Les travaux de [SGM+13] complètent ce genre de modélisation en évaluant les potentialités offertes par les images aériennes et satellitaires pour identifier et caractériser les grands types de végétation. Ils présentent notamment l'intérêt d'images en infrarouges qui facilitent l'identification et la caractérisation de diverses espèces végétales.

2.1.3.2 Méthodes exploitant des nuages de points

Les nuages de points, et spécifiquement les données LiDAR, sont de plus en plus souvent exploités dans la génération de modèle urbains 3D. [Pau03] présente notamment un état de l'art des méthodes permettant d'interagir avec ces nuages de points 3D pour développer des outils de modélisation et de traitements de géométries 3D.

De nombreuses méthodes ont été développées afin d'extraire des modèles 3D de la ville depuis des nuages de points, et notamment des bâtiments. [TKLG+07], [DP08], [AF13] et [SS13] par exemple proposent ainsi différents procédés permettant de détecter les surfaces représentant des toits de bâtiments à partir de données LiDAR. Il est alors possible de générer des modèles 3D simples des bâtiments correspondant, comme illustré dans la Figure 14.

[YHNF03] proposent une méthode permettant de modéliser les toits à partir de LiDAR aérien ne se limitant pas aux seuls toits plats. En utilisant des primitives géométriques prédéfinies (plans mais aussi cylindres et sphères par exemple), ils sont capables de représenter plus fidèlement certains toits complexes. Alors que la plupart de ces méthodes nécessitent une légère intervention humaine ou des choix de valeurs seuils pour des traitements, [AF14] proposent eux un procédé entièrement automatique de génération de bâtiments 3D à partir d'un LiDAR aérien ne nécessitant aucun réglage manuel dépendant de la zone traitée.

L'un des plus gros obstacles gênant la génération de bâtiments en 3D depuis un nuage de points est la végétation. En effet, les arbres sont souvent très proches des bâtiments et il peut s'avérer compliqué de les filtrer, mais également de récupérer l'information cachée par ceux-ci. [ZN08] proposent ainsi une méthode améliorant l'élimination des points correspondants à de la végétation et gênant la reconstruction des bâtiments, afin de proposer une modélisation 3D moins bruitée de ceux-ci. [BvACN13] associent à la fois des LiDAR aériens et des photographies aériennes afin de détecter et distinguer correctement les bâtiments et la végétation. Ce genre de classification permet notamment d'améliorer la précision des méthodes de génération de modèles 3D en limitant les bruits pouvant altérer la qualité de ceux-ci.

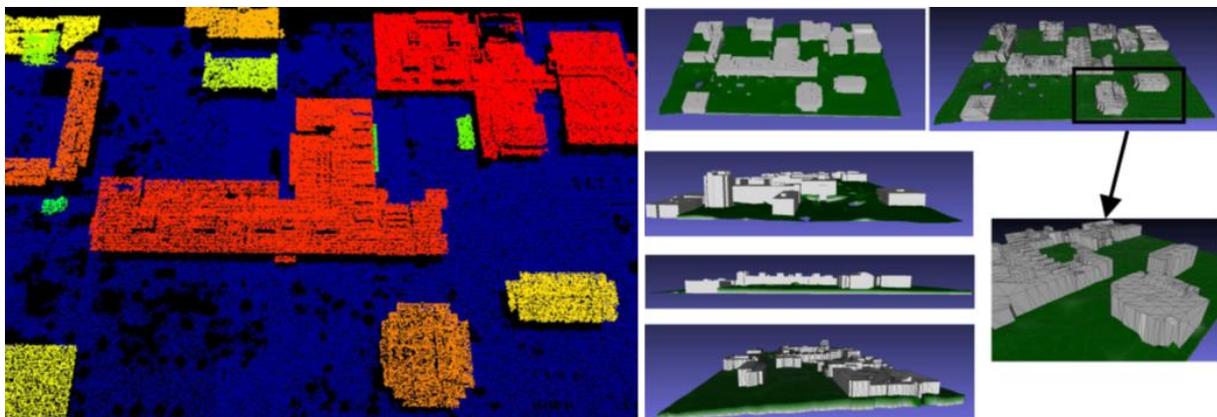


Figure 14 : A gauche : nuage de points filtré et segmenté avec le terrain en bleu et les toits de bâtiments. A droite : le modèle 3D triangulé qui a été généré grâce à ce nuage de points. (Images extraites de [SS13])

Cependant, il peut également être intéressant de détecter la végétation depuis un nuage de points pour simplement proposer une modélisation 3D de celle-ci. Par exemple, [RG08] exploitent les variations de la densité du nuage de point pour détecter les arbres. Ils ont en effet montré que le nuage de points issu d'un LiDAR aérien à haute résolution était anormalement dense en termes de points détectés proches du centre de la couronne d'un arbre, et que la détection de ces occurrences pouvait permettre de détecter une grande partie des arbres importants (70% de détection sur leurs jeux de test). [LM12] proposent une méthode

permettant de créer des modèles 3D à grande échelles composés de bâtiments, de terrain mais également d'arbres à partir de nuages de points aériens. Ces arbres sont simplement modélisés par des ellipsoïdes positionnées et paramétrées pour correspondre aux groupements de points considérés comme représentant de la végétation, puis reliées au maillage du terrain par un tronc cylindrique.

[WNW12] proposent une analyse plus fine de la végétation en exploitant des données issues de LiDAR multi-spectraux terrestres pour tenter de détecter des paramètres biochimiques des espèces végétales en utilisant des méthodes basées sur l'inférence Bayésienne, qui est par ailleurs expliquée par [HR01]. [Buc11] a mis en place l'algorithme SkelTre (Skeletonization of Trees) permettant de générer des structures squelettiques 3D d'arbres à partir de nuages de points terrestres (Figure 15). Les modèles 3D ainsi créés sont très précis mais les données nécessaires à sa création seront rarement disponibles sur un grand territoire puisque les nuages de points traités sont très denses (approximativement 1000 points par mètre carré, contre 10 points par mètre carré en moyenne sur les LiDAR aérien à notre disposition).

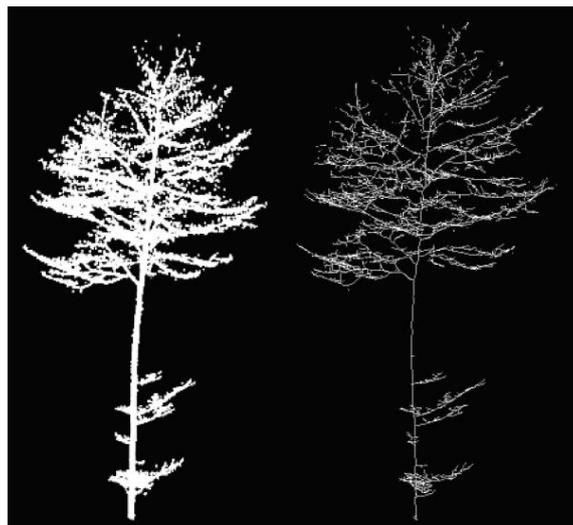


Figure 15 : A gauche : nuage de points d'un arbre avec des feuilles. A droite : le squelette SkelTre construit à partir de ce nuage de points. (Image extraite de [Buc11])

Il existe de nombreux autres types d'objets pouvant être présents dans des modèles de la ville et des méthodes d'acquisition particulières existent souvent. C'est par exemple le cas des lignes à haute tension qui peuvent être détectées à partir de données LiDAR (Figure 16), comme dans les travaux de [JSK09], [CTWL14] et [ZH14].

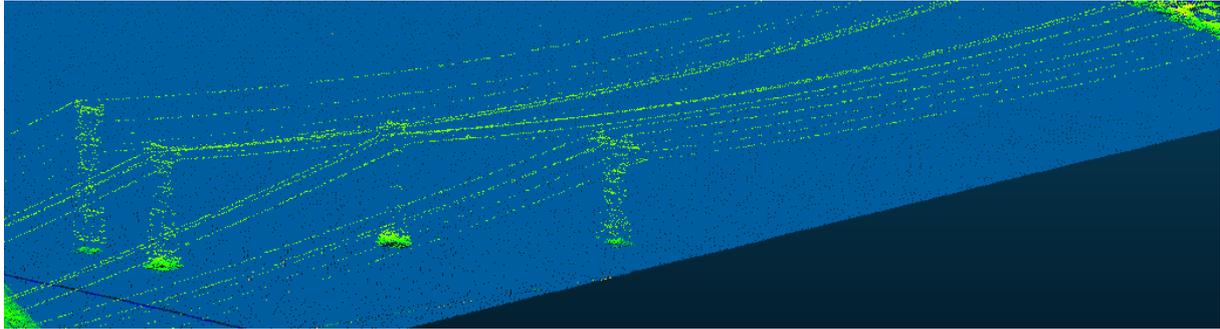


Figure 16 : Nuage de points LiDAR aériens modélisant des lignes à haute tension. (Données issues du site de la Métropole de Lyon²³)

2.1.3.3 Méthodes exploitant des jeux de données hétérogènes

La plupart des modèles 3D de la ville comportent des représentations plus ou moins précises des bâtiments en termes de géométrie mais s'intéressent peu à l'aspect sémantique de leur définition. Cependant, de nombreuses applications nécessitent une représentation plus riche des bâtiments en termes de sémantique afin de pouvoir par exemple identifier correctement des bâtiments par leur parcelle, leur adresse, leur date de construction, ou toute autre information inaccessible via une géométrie seule. Il peut donc s'avérer nécessaire de lier ces modèles 3D de bâtiments à des couches de données qui possèdent déjà ces informations. C'est dans cet objectif que [DT06], [VPDB09], [VPDBB11] et [Agu14] proposent des méthodes de génération de bâtiments 3D faisant intervenir des données externes comme le cadastre pour orienter la génération des modèles 3D. Les bâtiments ainsi créés auront une géométrie 3D mais contiendront également un identifiant cadastral et auront alors accès à toutes les informations sémantiques liées à celui-ci. [HDSP10] utilisent eux des nuages de point terrestres afin de générer des modèles 3D des façades des bâtiments visibles depuis la rue. Ils proposent ensuite de lier ces données avec le cadastre de la ville afin de générer une découpe correcte de ces façades et proposer une visualisation intégrée dans des photographies géo référencées.

Il n'est cependant pas toujours possible de pouvoir agir dès le processus de génération du modèle 3D, et il est donc nécessaire de pouvoir également lier un jeu de données comme le cadastre à un modèle virtuel de ville déjà généré en 3D. C'est notamment pour répondre à ce besoin que [RBDK09] ont proposé un procédé permettant d'enrichir un modèle urbain 3D à l'aide de divers jeux de données externes, qui peuvent être des données raster ou vectorielles 2D, des plans de construction, etc. Cet enrichissement peut se faire via l'ajout d'attributs, de liens vers des médias ou de textures appliquées aux objets 3D accompagnées de légendes décrivant la signification des couleurs.

Dans la problématique déjà introduite de pouvoir détecter efficacement les zones de végétation et d'en proposer une modélisation 3D, [LGH+03] utilisent des images multi-spectrales aériennes combinées à des données LiDAR également aériennes afin d'identifier les arbres. Les images permettent notamment de délimiter les zones correspondant à des arbres alors que le nuage de points LiDAR permet de déterminer la hauteur de ces arbres.

Les routes occupent également une place importante dans le paysage urbain et il est donc légitime de vouloir les représenter dans un modèle 3D de la ville. [NDD14] se concentrent ainsi sur la génération de routes 3D dont le tracé est réaliste grâce à la génération de courbes G^1 continues à partir d'une base de données vectorielles représentant les tracés des routes en 3D via des poly-lignes. [SLNZ09] proposent eux une méthode permettant de plaquer les tracés de routes 2D issus d'OpenStreetMap sur un terrain 3D déjà généré afin de créer une modélisation 3D de ces routes qui viendra compléter le modèle virtuel global de la ville.

Alors que les travaux de [NDD14] permettront de générer des représentations de routes plus crédibles puisqu'elles respecteront les contraintes d'élaboration de celles-ci, ceux de [SLNZ09] permettront de produire des modèles plus faciles à exploiter puisqu'ils seront en relation avec les représentations des autres éléments décrivant le territoire. La génération de courbes proposées par [NDD14] risquera par exemple de produire des portions de route empiétant sur des bâtiments ou ne pouvant être superposés au terrain.

Les méthodes qui viennent d'être présentées font intervenir un champ varié de données décrivant des territoires urbains, et les méthodes employées sont souvent complémentaires les unes avec les autres. En effet, bien qu'elles aient été définies séparément, elles apportent des aspects différents de la modélisation 3D des objets qu'elles représentent, et les modèles virtuels de ville gagneraient très probablement à pouvoir exploiter tout un ensemble de données afin de générer leurs maquettes 3D. Par exemple, il serait intéressant d'utiliser une méthode de détection de végétation exploitant les informations complémentaires provenant d'images et de LiDAR afin d'en générer une modélisation 3D. Grâce à cette détection précise, il serait ensuite plus aisé de détecter les bâtiments en éliminant les bruits potentiels liés à cette végétation. En utilisant des photographies et des LiDAR terrestres et aériens, il serait alors possible de générer une modélisation complète (au niveau du sol aussi bien qu'au niveau des toits) et texturée des bâtiments en 3D. Ces modèles 3D de bâtiments pourraient ensuite être sémantiquement enrichis en exploitant un jeu de données 2D vectorielles géoréférencées tel que le cadastre.

Outre la difficulté évidente de posséder tous ces jeux de données sur une même zone, il faudrait également être capable de gérer ces multiples données hétérogènes qui peuvent différer sur de nombreux points. Ces données auront différents formats (raster, vectoriel) et seront composées de géométries variées (points 2D/3D, polygones 2D/3D, etc.) pouvant être localisées dans des systèmes de référence spatiale différents (référentiel local, référentiel régional, national, etc.). Elles posséderont des définitions sémantiques différentes (une parcelle peut être représentée par un unique polygone alors que les bâtiments qui s'y trouvent seront définis isolément dans un autre jeu de données) et amèneront chacune des imprécisions dues à leurs diverses méthodes d'acquisitions ou aux différences de dates de ces acquisitions (comment traiter le cas où un bâtiment généré en 3D via photogrammétrie se trouve partiellement en dehors de la parcelle correspondante dans le cadastre officiel ?). Les précisions de relevé ne seront pas non plus les mêmes parmi ces diverses données. De plus, toutes ces contraintes doivent pouvoir être gérées sur un territoire potentiellement très vaste, qui peut par ailleurs ne pas être exactement le même pour tous les jeux de données.

Une problématique restant ouverte vis-à-vis de ces modèles 3D concerne leur validité. Si l'utilisation de multiples données permet de limiter l'influence des imprécisions et des bruits de chacune lors de la génération du modèle 3D, il n'existe pas réellement de méthode permettant de qualifier l'exactitude d'un modèle vis-à-vis de la réalité. La seule vérification pouvant être faite concerne les éventuelles erreurs en termes de géométrie ou de sémantique du modèle 3D en lui-même (exemple : une jointure imparfaite entre un mur et le toit d'un bâtiment qui empêche d'avoir un solide fermé), et c'est dans cette logique que [SK07] proposent une méthode permettant de quantifier la qualité d'un modèle 3D selon différents paramètres. [MTT+13] se sont concentrés sur l'évaluation qualitative des bâtiments d'un modèle 3D grâce à des images aériennes multi-spectrales. Cependant, cette qualification dépend elle-même d'un jeu de données acquis automatiquement et des imprécisions éventuelles qui lui sont liées.

[OGC16] a proposé une liste de recommandations (Quality Interoperability Experiment) pour la génération de modèles 3D auxquelles il est possible de se référer mais cela reste un ensemble de recommandations définies empiriquement qui ne permettent pas de quantifier la qualité ou la précision d'un modèle 3D donné.

2.1.4 Les standards permettant d'échanger les modèles virtuels de la ville

Nous venons de présenter un certain nombre de méthodes permettant de générer des modèles virtuels de la ville, mais il faut également s'intéresser à la problématique consistant à stocker ces résultats de manière interopérable afin qu'ils puissent facilement être exploités par des personnes extérieures.

C'est pour répondre à ceci que des standards sont mis en place, tels que le format Shapefile [ESR98] utilisé afin de stocker des modèles vectoriels de systèmes d'informations géographiques. Dans un contexte plus spécifique au bâtiment, le format libre IFC (Industry Foundation Classes³²) est un standard d'échange permettant de modéliser des bâtiments tout au long de leurs cycles de vie.

De manière plus globale, il existe les normes ISO/TC 211 qui « *peuvent spécifier, pour l'information géographique, des méthodes, outils et services pour la gestion de données (y compris leur définition et leur description), l'acquisition, le traitement, l'analyse, l'accès, la présentation et le transfert de ces données sous forme numérique / électronique entre les différents utilisateurs, systèmes et sites* » (Définition issue du site de l'Organisation internationale de normalisation³³).

C'est également dans l'objectif de produire des standards ouverts d'échange de données dans le domaine de l'information géographique que s'est développé l'Open Geospatial Consortium (OGC), un organisme de normalisation créé en 1994. L'OGC compte plus de 500 partenaires dans le monde entier qui travaillent ensemble afin d'aboutir au développement et l'implémentation de standards ouverts garantissant l'interopérabilité des données et des services pour des systèmes d'information géographique.

Le CityGML est un standard publié par l'OGC afin de stocker des modèles virtuels 3D de ville, qui a été officiellement adopté en Aout 2008. C'est un modèle de données basé sur le langage XML utilisé pour la représentation de mondes urbains en 3D. Il permet de définir géométriquement et sémantiquement les objets de la ville ([KGP05], [GKCN08], [Kol09], [GKNH12]). La géométrie y est modélisée par des polygones 3D dont l'ensemble forme le maillage 3D des objets pouvant être de différents types. Un objet donné peut être constitué de

³² <http://buildingsmart.org/ifc/>

³³ <https://www.iso.org/fr/committee/54904.html>

plusieurs niveaux de sous éléments sémantiquement définis pour lesquels une géométrie peut être associée. La Figure 17 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** illustre cette double définition sémantique/géométrique d'un bâtiment dans le cadre du standard CityGML.

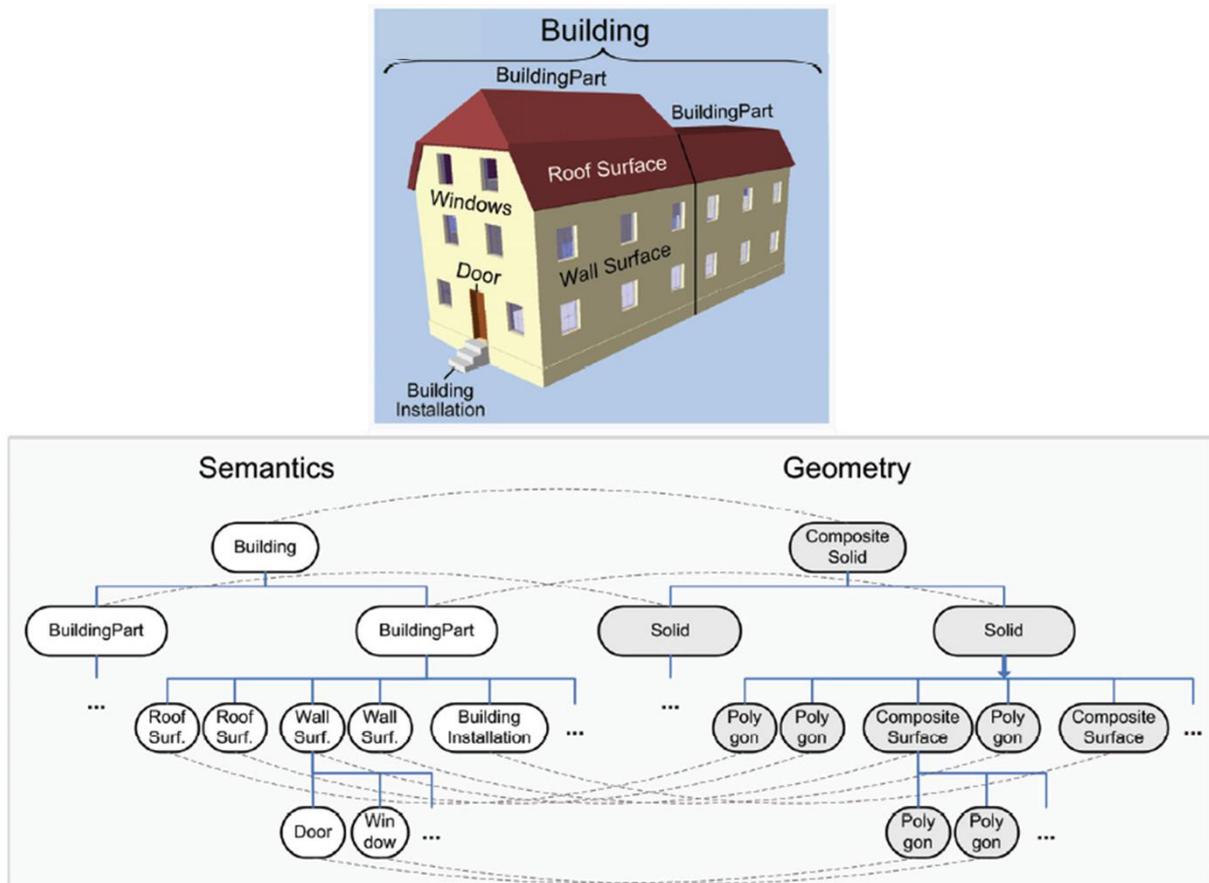


Figure 17: Modèle sémantique et géométrique d'un bâtiment selon le standard CityGML. (Image extraire de [SK07])

La Figure 18 représente le diagramme UML du modèle de bâtiment défini par le standard CityGML. Nous pouvons notamment y repérer les objets géométriques en vert et ceux en jaune ayant pour vocation de définir sémantiquement le bâtiment et ses éléments. De plus, chaque élément peut également contenir un ensemble d'attributs qui le définissent et le caractérisent, comme par exemple sa date de construction ou sa fonction.

Le standard CityGML propose différents LoDs pour ses objets, comme par exemple les 5 LoDs (de LoD0 à LoD4) définis pour le bâtiment, permettant de le représenter depuis une simple empreinte au sol (LoD0) jusqu'à une modélisation 3D précise intérieure et extérieure (LoD4). Nous pouvons remarquer dans la Figure 18 que les différents LoDs sont indépendants les uns des autres. Il n'existe pas de transition permettant de passer de l'un à l'autre. Chaque LoD a ses propres objets sémantiques et ses propres géométries. La Figure 19 illustre les 5 LoDs des bâtiments définis dans le standard CityGML.

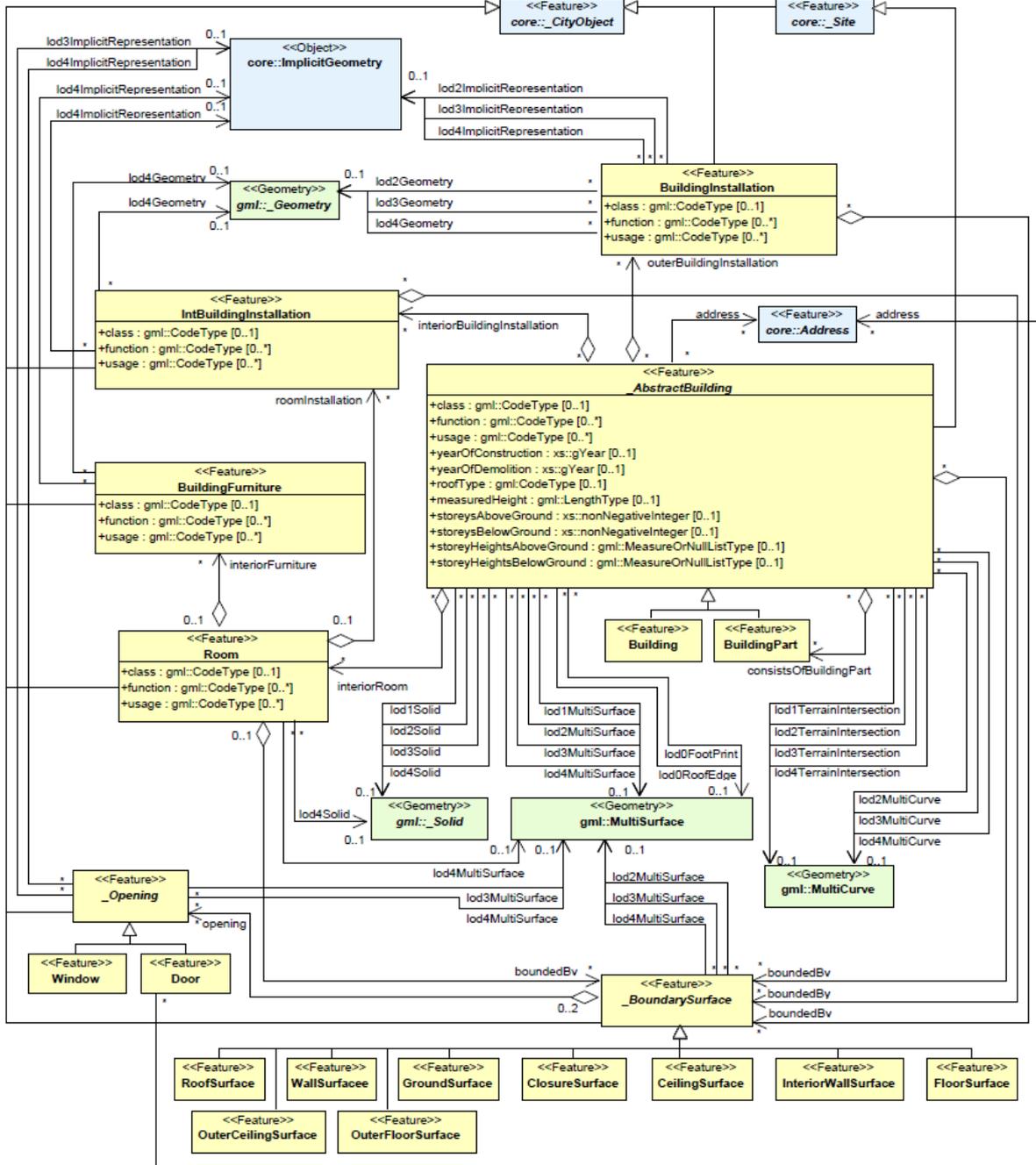


Figure 18: Diagramme UML de l'objet Bâtiment du standard CityGML. (Image extraite de [GKNH12])

Le LoD 0 correspond aux emprises au sol de bâtiments et le LoD 1 propose une boîte simple correspondant à cette emprise au sol extrudée avec une seule valeur de hauteur. Le LoD 2 propose une structure détaillée des toits mais conserve l'enveloppe définie par l'emprise au sol initiale. Les murs sont verticaux et correspondent aux bordures de toits projetées sur le sol. Le LoD 3 introduit un certain nombre d'éléments supplémentaires comme les portes et les fenêtres, et les murs ne correspondent plus forcément aux bords de toit. Le LoD 4 ajoute une modélisation intérieure.

Le LoD 2 est actuellement la représentation la plus répandue parmi les modèles virtuels de ville disponibles. Certains sont encore en LoD 1 mais très peu sont en LoD 3 ou 4.



Figure 19 : 5 LoDs des bâtiments définis dans le standard CityGML. (Image issue de de [BLS16b])

Ces niveaux de détails restent cependant soumis à des discussions, et plusieurs améliorations ont été proposées. [KZD12] ont ainsi développé des LoDs de bâtiments complémentaires à ceux existants afin de proposer une modélisation intérieure plus adaptée à des outils de préventions de risques naturels. [BLS16b] ont plutôt développé cette notion de LoDs pour la modélisation extérieure des bâtiments en partitionnant chacun des 4 premiers LoDs des bâtiments en 4 sous niveaux (exemple : LoD2.0, LoD2.1, LoD2.2 et LoD2.3 au lieu d'un unique LoD2). Ces nouveaux niveaux sont présentés dans la Figure 20.

	LOD x.0	LOD x.1	LOD x.2	LOD x.3
LOD0	 LOD0.0	 LOD0.1	 LOD0.2	 LOD0.3
LOD1	 LOD1.0	 LOD1.1	 LOD1.2	 LOD1.3
LOD2	 LOD2.0	 LOD2.1	 LOD2.2	 LOD2.3
LOD3	 LOD3.0	 LOD3.1	 LOD3.2	 LOD3.3

Figure 20 : Les nouveaux LoDs du standard CityGML proposés pour les bâtiments par [BLS16b]. (L'image est issue de cette publication)

Un avantage de ce standard est qu'il peut être facilement enrichi grâce à des Application Domain Extension (ADE) qui viennent le compléter sans changer le cœur du modèle, ce qui permet notamment de tester ces propositions d'améliorations avant de peut-être les incorporer au standard. Cela permet également aux organisations qui en ont besoin de pouvoir utiliser ces ajouts sans avoir à attendre qu'ils soient potentiellement ajoutés au standard lui-même. Ce fut notamment le cas de l'ADE Utility Network qui fut proposée en 2010 afin d'ajouter au CityGML la gestion des infrastructures et réseaux d'approvisionnement de la ville (gaz, eau, électricité, etc.) [BNK10].

Comme nous l'avons déjà introduit, les modèles virtuels 3D de la ville sont généralement stockés par millésimes indépendants représentant la période à laquelle ils ont été acquis (comme les données générées en 2009, 2012 et 2015 sur la ville de Lyon). Il est cependant nécessaire de proposer des méthodes permettant de gérer efficacement un modèle temporel unique englobant ces différents millésimes. L'aspect temporel des modèles virtuels 3D de la ville a ainsi été abordé dans le cadre du standard CityGML par notre équipe dans les travaux de [MG14] et [PGG15] qui proposent et utilisent une ADE permettant de compléter l'information temporelle pouvant être liée aux objets de la ville. Cette ADE temporelle permet ainsi de référencer différents états d'un même objet via une liste de changements (pouvant aussi bien concerner sa sémantique, sa géométrie, sa topologie ou son apparence) liés à une date, dans un unique fichier CityGML.

[CSG+17] vont plus loin en proposant une ADE permettant au standard CityGML de gérer, en plus de l'aspect temporel des objets d'un modèle virtuel 3D de la ville, la présence de plusieurs versions d'un même objet ou d'une même zone. Cela permet de faire cohabiter plusieurs vues concurrentes et ainsi pouvoir représenter et référencer dans un même fichier CityGML plusieurs versions concurrentes d'un futur projet d'urbanisation par exemple.

Ces propositions ont été faites à l'OGC qui les a intégrées dans la future version 3.0 du standard CityGML.

2.2 Analyse des modèles virtuels de la ville

Il existe de nombreux types d'applications impliquant des modèles virtuels de la ville, dont [BSL+15] ont fait un état de l'art complet pour les modèles 3D. Nous allons ici seulement nous intéresser aux travaux de recherches proches des analyses que nous avons mises en place au cours de cette thèse.

Nous avons présenté précédemment des travaux permettant de gérer des modèles de ville contenant plusieurs représentations du même territoire. Ces représentations peuvent correspondre à des états successifs qui permettent de modéliser la ville au cours d'une période temporelle, ainsi qu'à des versions parallèles ou concurrentes de certains éléments de cette ville (Figure 21). Ces dernières, que nous appelons des représentations « versionnées », peuvent correspondre à des incertitudes historiques (lorsqu'aucun consensus n'est trouvé dans le cadre d'une représentation historique par exemple, et qu'il y a donc plusieurs scénarios envisagés), à des scénarios imaginaires (à quoi aurait ressemblé la ville si tel projet avait été mené à son terme), ou à des réflexions d'urbanisme (plusieurs versions concurrentes amenées par divers cabinets d'architectes dans le cadre d'un appel à projets par exemple).

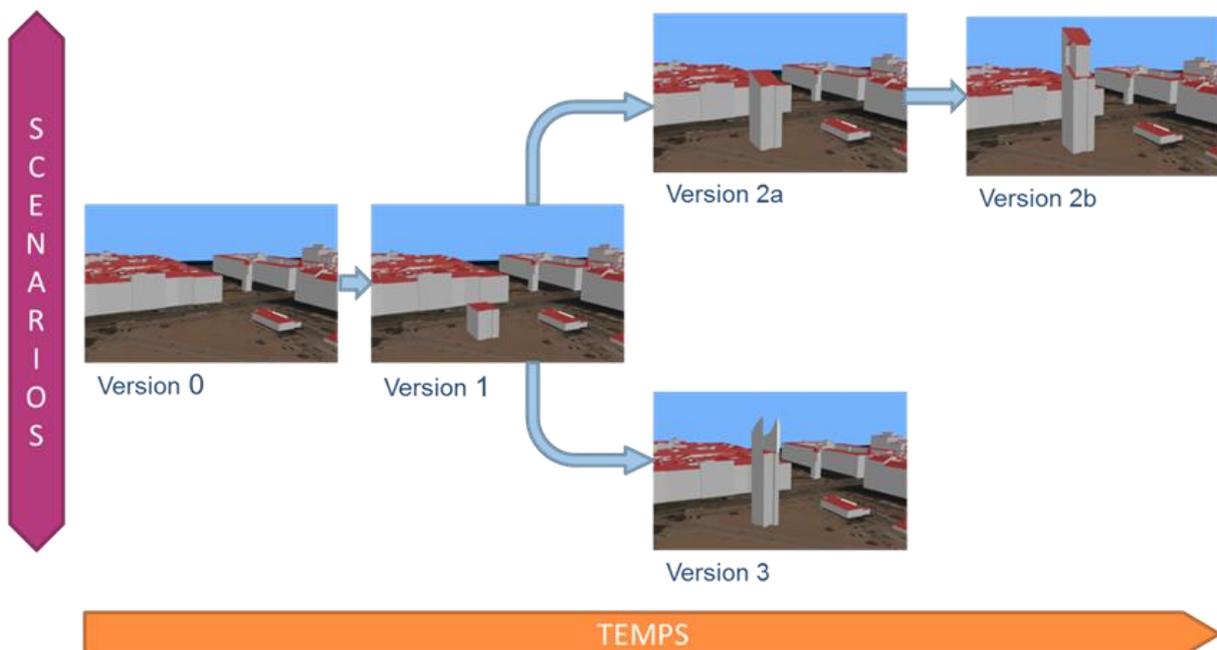


Figure 21: Représentations dynamiques de la ville.

Nous allons dans un premier temps présenter des méthodes permettant de comparer des modèles isolés représentant le même territoire mais générés à des dates différentes, afin de

faciliter la mise en place d'un modèle temporel qui référence les éventuels changements apparus.

Ces différentes représentations d'un même territoire (temporelles et versionnées) peuvent alors être utilisées dans un outil de visualisation adapté permettant de facilement passer d'un état à l'autre et ainsi permettre à l'utilisateur d'appréhender visuellement les différences. Mais elles peuvent également servir dans des outils d'analyse afin de quantifier ces différences. Nous désirons ainsi pouvoir mesurer l'impact de changements apparus entre deux versions d'un modèle urbain (temporellement espacées ou concurrentes). Par exemple, un nouveau projet de tour aura ainsi un impact certain sur le territoire environnant (proche mais également à plus grande échelle) selon de nombreux critères, dont certains pourraient être estimés automatiquement grâce à des simulations : les impacts en termes de pollution, de bruit, d'ensoleillement, de visibilité, etc.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à ces deux derniers exemples car la méthode de simulation est similaire et relativement simple à mettre en place (ce sont des lancers de rayon provenant soit du soleil, soit d'un observateur), mais qui nécessitent cependant une organisation efficace du territoire puisque ces impacts peuvent se répercuter sur plusieurs kilomètres. De plus, ils permettent de générer un ensemble d'indicateurs variés qui peuvent ensuite être exploités à l'aide de jeux de données externes afin de produire des analyses caractéristiques (par exemple, il est possible de croiser les résultats d'analyse avec une cartographie des zones ouvertes au public afin de qualifier l'accessibilité des zones remarquables – car souvent ensoleillée ou profitant d'une belle vue – de la ville), ce qui démontre un nouvel intérêt au concept de croisement de données hétérogènes.

Nous allons maintenant présenter des travaux déjà existants qui s'intéressent à des analyses de visibilité et d'ensoleillement.

2.2.1 Détecter les changements apparus entre deux modèles urbains

Puisque les données sont des captures datées du territoire urbain, une application répandue consiste à vouloir comparer plusieurs de ces captures afin d'étudier et de quantifier les changements apparus au cours de la période séparant les deux acquisitions. Outre la comparaison sémantique qui pourrait être mise en place (exemple : quels sont les bâtiments

ayant changé de propriétaire ?), nous allons ici uniquement nous intéresser aux méthodes détectant les changements physiques apparus au cours d'une période donnée.

Par exemple, [Cha07] propose de détecter les évolutions de bâtiments entre un cadastre et un jeu de données nouvellement générées constitué d'un modèle numérique d'élévation (MNE) et d'orthophotographies RGB et infrarouges. Dans cette méthode, les primitives géométriques de bâtiments sont extraites depuis les orthophotographies infrarouges et le MNE, afin de pouvoir les comparer avec la primitive de chaque élément du cadastre, qui correspond à une enveloppe polygonale représentant l'emprise au sol du bâtiment. Cette comparaison est effectuée en calculant un score de similarité entre les bâtiments des deux jeux de données qui se superposent afin de distinguer différents cas : bâtiments inchangés, modifiés ou démolis. [MHH03] et [MKH07] proposent une approche similaire en utilisant le même type de données pour la date la plus récente (MNE + orthophotographies infrarouges) mais avec cette fois-ci une version raster des bâtiments pour l'ancienne acquisition. Ils utilisent notamment un arbre de classification pour les paramètres permettant de calculer les scores de similarité entre les bâtiments. [OK05] exploitent des données similaires afin de détecter automatiquement les changements apparus entre deux acquisitions et ainsi orienter une campagne de mise à jour des données en lui permettant de se focaliser sur les zones qui ont évolué. [Rot08] proposent également une méthode similaire mais pouvant traiter aussi bien des données vectorielles que raster pour détecter les changements concernant les bâtiments. [SBAW13] proposent une comparaison entre deux dates à l'aide de modèles virtuels constitués tous deux de MNE et d'orthophotographies. Ils rencontrent cependant des problèmes liés à la végétation qui gêne l'extraction des bâtiments, ainsi qu'aux groupements de bâtiments proches qui empêchent leur extraction de manière individuelle. Ces problématiques, qui sont caractéristiques des méthodes impliquant des bâtiments extraits automatiquement depuis des données brutes, justifient notamment les méthodes présentées précédemment qui proposent d'améliorer la sémantique des bâtiments à l'aide de données externes comme le cadastre, ainsi que celles permettant de détecter précisément la végétation. Une comparaison de plusieurs de ces méthodes de détection de changements a été proposée par [CRM+09].

Il existe également des méthodes permettant d'étudier les évolutions d'un territoire urbain en utilisant directement des modèles 3D déjà générés. [TBP13] proposent ainsi une comparaison entre un cadastre 3D (qui correspond à peu près au LoD2 CityGML des bâtiments) et des

images panoramiques géo référencées issues de Google StreetView³⁴. Les changements peuvent ainsi être directement visualisés dans les images panoramiques (Figure 22).

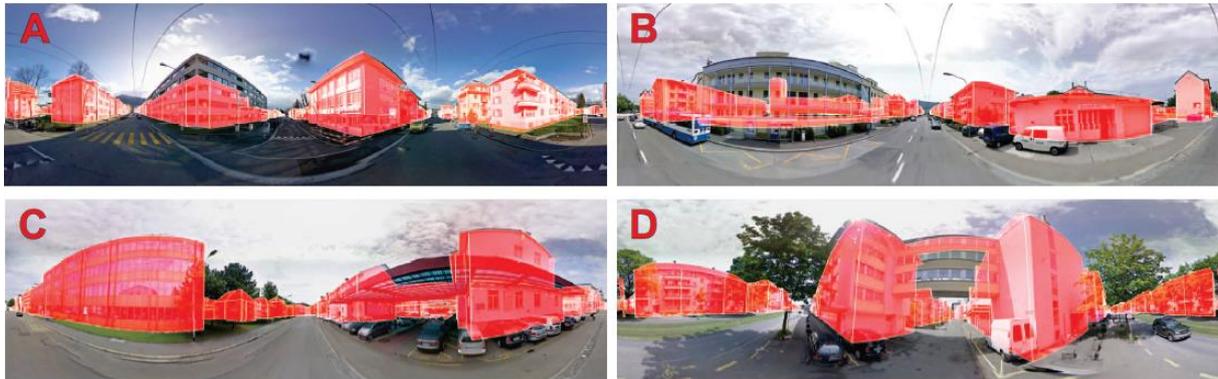


Figure 22 : Bâtiments 3D issu du modèle de la ville initial (en rouge) incorporés dans les images panoramiques de 4 zones où un changement a été détecté. (Image extraite de [TBP13])

Comparer deux modèles 3D via leurs géométries peut aussi se faire grâce à l'utilisation de méthodes déjà connues en informatique graphique consistant à comparer des géométries 3D. Nous pouvons notamment citer la distance de Hausdorff qui permet de mesurer initialement l'erreur entre deux modèles 3D [CRS98], mais qui peut se révéler très coûteuse en temps de calcul si de nombreuses géométries doivent être comparées. [CLL+13] proposent une comparaison de différentes méthodes permettant de comparer des maillages triangulés, notamment afin de mesurer l'erreur apportée par des processus de simplification.

2.2.2 Etudes de visibilité

Le développement des modèles 3D de la ville ouvre de nouvelles perspectives pour les analyses de visibilité. Nous appelons analyse de visibilité le principe d'étudier un champ de vision localisé précisément afin de le qualifier et de déterminer qui voit quoi. Cela peut par exemple permettre de simplement détecter les objets visibles depuis ce point de vue, de qualifier cette vue selon les objets visibles (si il y a de la végétation, des constructions artificielles, un monument précis, ..), ou encore de la qualifier selon des critères purement géométriques (est-ce que des objets proches bloquent la vue ?).

Si l'utilisation de modèles 3D améliore la précision et la pertinence des analyses produites, ils fourniront également des résultats plus immersifs dans lesquels un utilisateur non expert pourra plus facilement identifier son environnement et comprendre les résultats correspondants.

³⁴ <https://maps.google.fr/>

Cependant, parmi les études scientifiques et opérationnelles produites et utilisées par les praticiens, la grande majorité sont basées sur des analyses 2D. Par exemple, les modèles 2D sont utilisés pour catégoriser l'environnement d'une voie piétonne [LCO11] ou pour qualifier un paysage [Wei11] en utilisant le concept d'isovist, défini par [Ben79] comme étant "l'ensemble de tous les points visibles d'un point de vue donné dans l'espace et par rapport à un environnement".

Si ces analyses de modèles 2D fournissent des informations concernant la distance jusqu'à laquelle un bâtiment peut être vu, ainsi que des indicateurs permettant de déterminer les zones susceptibles d'être affectées par son impact visuel, elles ne traitent pas les surfaces verticales, en particulier les façades, comme l'ont noté [SJF12].

Il existe de multiples travaux qui illustrent l'utilisation de modèles 3D pour générer des analyses de visibilité plus complètes. Par exemple, [MR09], [SJF12] et [SJF13] proposent des extensions 3D au concept d'isovist appliqués sur des modèles numériques d'élévation. Un tel isovist est illustré Figure 23.

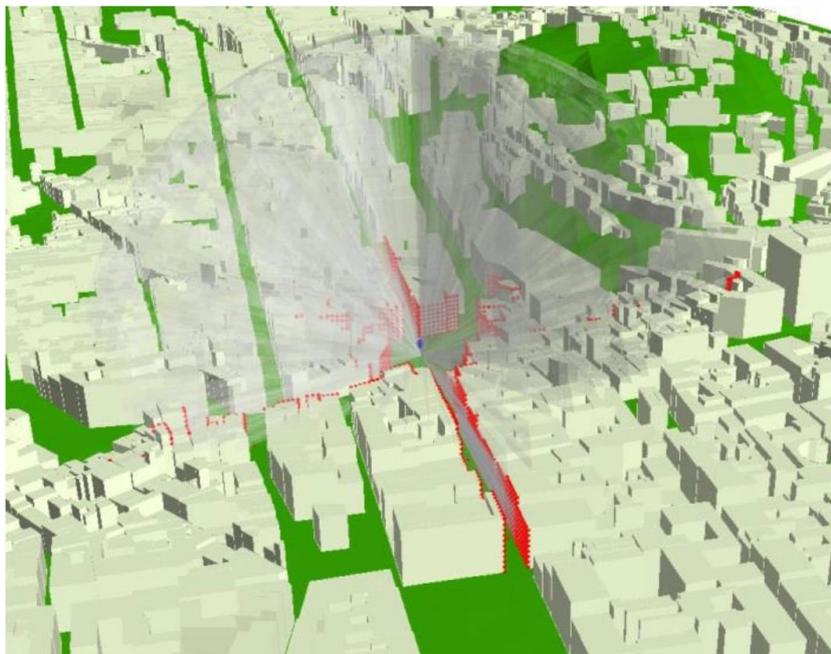


Figure 23 : Isovist 3D généré depuis un point de vue donné. (Image extraite de [SJF12])

[BRKM10] s'intéressent aux monuments en quantifiant leurs visibilités depuis un point de vue donné, et en définissant de nouvelles métriques extraites d'un modèle de ville 2.5D. [YPL07] utilisent également des modèles 2.5D pour développer leur concept d'analyse de "viewsphere" qui consiste à estimer la visibilité d'une scène, définie par un point de vue et son environnement sphérique, en calculant des indicateurs basés sur des mesures de volumes.

[CMDG03] choisissent une approche différente : ils pré-calculent une base de données complète d'intervisibilité (qui voit quoi, et inversement qui est vu de quoi) sur un modèle numérique d'élévation afin de pouvoir générer directement des mesures pouvant être exploitées dans le cadre de besoins spécifiques en matière de prise de décision. Pour chaque point du MNE, le « viewshed », qui est un concept proche de l'isovist [Llo03], est calculé et stocké afin d'être rapidement accessible lorsqu'il est requis par des traitements spécifiques. Par exemple, ces résultats de visibilité peuvent être utilisés pour calculer les chemins les plus et les moins exposés en termes de visibilité entre deux positions du terrain. [CAM+14] et [RAAC15] proposent des méthodes pour calculer une carte colorée de visibilité d'un point de vue spécifique : une couleur est attribuée à chaque point de son entourage en fonction de la visibilité de ce point-là depuis le point de vue. [Ros11] relie une analyse de viewsheds, utilisée afin de détecter les zones les plus exposées (les belvédères) d'un modèle d'élévation numérique, avec des évaluations du paysage basées sur des études d'experts afin de générer un score décrivant la qualité du paysage qui est visible depuis un point de vue donné. Cela permet notamment de détecter les endroits remarquables en termes de paysages qui proposent une grande visibilité sur le territoire environnant.

Si ces analyses de visibilité offrent des outils pour qualifier les paysages urbains et naturels, elles peuvent également être utilisées pour mesurer l'impact visuel d'un objet urbain spécifique, comme des bâtiments (existants ou en projet) sur ces paysages. C'est le cas dans les travaux de [HGA04] qui proposent une méthode permettant de mesurer l'impact visuel de bâtiments ruraux sur le paysage naturel environnant, pour ensuite comparer ces résultats à un sondage public visant à quantifier l'impact de ces mêmes bâtiments. Dans une idée similaire, [DNM09] s'intéressent à l'évaluation de l'impact visuel de nouveaux projets sur différentes villes italiennes, en calculant des analyses de viewshed avant et après l'ajout des bâtiments et en comparant les résultats afin d'évaluer l'impact visuel de ces projets. Avec le développement de modèles de villes versionnés qui peuvent proposer des versions concurrentes d'un territoire urbain, comme l'illustre la proposition d'ADE du standard CityGML [CSG+17], ces analyses de visibilité peuvent également être utilisées pour comparer l'impact visuel de multiples projets d'urbanisation concurrents.

Le skyline est également un indicateur intéressant en termes de visibilité d'une ville. Il représente une silhouette urbaine qui varie grandement d'une ville à l'autre. De par l'influence directe des tours sur sa forme, il se retrouve souvent au centre des débats sur la pertinence du retour de celles-ci, comme le montrent [App08] et [AM15]. [Gas09] s'est donc

intéressé à cette notion de skyline, à sa génération, sa composition mais également aux différentes interprétations que l'on peut en faire. [YNG14] se sont eux servis du skyline comme un indicateur permettant de mesurer l'impact de nouveaux projets de tour dans la ville de Kuala Lumpur (Malaisie).

La plupart des travaux présentés proposent une étude de visibilité des modèles 3D mais ne traitent pas le problème de mise à l'échelle inhérent aux applications liées à ces données, ou assument le fait que leurs méthodes ne peuvent traiter qu'une zone limitée. Cela peut s'avérer être un frein alors que les territoires modélisés sont de plus en plus vastes et que l'impact visuel de certains éléments peut se mesurer sur plusieurs kilomètres.

Ces différents travaux se concentrent également sur l'analyse de l'impact visuel des bâtiments et abordent rarement d'autres types d'objets urbains tels que la végétation, les monuments, ou tout autre élément urbain susceptible d'avoir un certain impact en termes de visibilité. Étant donné que ces types de données sont maintenant correctement gérés dans des standards comme le CityGML, il est nécessaire de proposer une méthode générique capable de les manipuler sémantiquement et géométriquement afin de proposer des résultats aussi complets que possible en fonction du modèle de ville 3D proposé.

2.2.3 Etudes d'ensoleillement et mesures de l'ombre

Le calcul de l'impact de la lumière du soleil sur un modèle de ville en 3D est un des nouveaux sujets émergents parmi les applications utilisant ces modèles virtuels. Par exemple, il peut aider à choisir la meilleure zone d'implantation pour un projet spécifique, comme la terrasse d'un café ou un d'un restaurant, des panneaux photovoltaïques [DDSGCC11], l'agriculture urbaine [JLTC15], etc.

Le calcul des ombres en temps réel est un problème bien étudié dans les jeux vidéo et les applications orientées vers le rendu visuel. [MHE+03] présentent plusieurs méthodes pour calculer le rendu de l'ombre en temps réel par rasterisation. Ces méthodes permettent un calcul d'ombre rapide, mais ne permettent pas de savoir quel objet a provoqué l'ombre (ils ne donnent que des informations sur les pixels situés ou non dans l'ombre), or cette information peut s'avérer importante pour quantifier l'impact des objets sur le territoire urbain. En outre,

comme ces procédés se concentrent sur la visualisation, ils ne fonctionnent que dans le champ de vision de la caméra et le niveau de détail dépend de la distance à la caméra.

La plupart des projets intéressés par les analyses solaires se concentrent sur le calcul du rayonnement solaire avec plusieurs applications possibles telles que la planification de l'énergie ou l'évaluation du potentiel photovoltaïque. Les solutions industrielles telles que CiberCity³⁵, GTA GeoService GmbH³⁶ ou I-Scope³⁷, ainsi que des projets comme OpenSolarMap³⁸ proposent des solutions pour calculer le rayonnement solaire des toits afin d'étudier leurs potentiels solaires.

[FCRB15] présentent un état de l'art détaillé sur la modélisation du potentiel solaire dans l'environnement urbain. Ils présentent et comparent plusieurs méthodes basées sur des algorithmes numériques de rayonnement couplés à des outils GIS permettant une représentation, des analyses et une visualisation en 2D, mais aussi des méthodes plus complexes impliquant des modèles 3D. Le module v.sun de [HZ12] pour GRASS GIS fait partie de cette dernière catégorie. Il propose une méthode calculant le rayonnement solaire sur la ville à partir d'un modèle vectoriel 3D en utilisant une nouvelle approche vecteur-voxel permettant de mesurer sur un bâtiment l'impact en termes d'ombres de ceux qui l'entourent. Cependant, ils se concentrent uniquement sur le rayonnement solaire des bâtiments sur de petites zones (0,5 km²) et ne traitent pas l'impact global des objets de la ville sur leur environnement. La plupart des autres méthodes présentées par [FCRB15] sont destinées à des données raster 2D ou 2.5D. Cependant, celle proposée par [RCB13] permet de calculer le rayonnement solaire sur les surfaces horizontales, inclinées et verticales des données LIDAR. Même si les résultats sont précis, il s'agit d'une approche assez complexe qui est destinée aux petites surfaces (160 m² composés de 9 bâtiments principaux dans leur cas).

[ACZO12] et [SAD+12], qui sont membres du projet Simstadt³⁹ [NBB+15], s'intéressent également à l'étude de la potentialité et l'intégration photovoltaïque dans les villes. Ils proposent une méthode intéressante pour calculer les ombres en ville qui se base sur un algorithme de lancer de rayons sur un modèle de ville 3D triangulé. Les rayons partent du centre des triangles du maillage et se propagent en direction de différentes positions du soleil au cours de la période d'étude. Si une intersection avec un autre objet est trouvée, le triangle à

³⁵ CiberCity : <http://www.cybercity3d.com/>

³⁶ GTA GeoService GmbH : <http://www.gta-geoservice.de/>

³⁷ I-Scope : <http://www.iscopeproject.net/>

³⁸ OpenSolarMap : opensolarmap.org

³⁹ <http://www.simstadt.eu/en/index.html>

l'origine du rayon est considéré comme étant dans l'ombre. Pour obtenir des résultats plus précis, lorsqu'un triangle est détecté dans l'ombre, il est alors subdivisé et d'autres rayons sont générés depuis le centre des triangles nouvellement créés. Ce processus peut être renouvelé plusieurs fois en fonction de la précision désirée.

Cette méthode n'est cependant appliquée que sur une petite zone (1,5 km²) et uniquement avec des toits ayant un potentiel photovoltaïque élevé (dont la détection a été effectuée auparavant lors d'une pré-étape de filtrage). En outre, seules les ombres générées par les bâtiments sont prises en compte, les autres objets tels que le terrain ou la végétation n'étant pas considérés. Les résultats ne ressortent pas non plus d'informations au niveau des objets qui ont généré de l'ombre et ne permettent donc pas de mesurer l'impact en termes d'ombre des différents éléments de la ville. [WNMW15] proposent également un calcul du rayonnement solaire sur les modèles de villes 3D en utilisant une méthode de lancer de rayons. Cependant, au lieu de trianguler les modèles 3D jusqu'à atteindre une résolution prédéfinie, ils créent une grille régulière sur chaque face du bâtiment (murs et toits) et génèrent des rayons à partir des points de cette grille (Figure 24). Mais cette méthode traite uniquement les bâtiments, et même si l'ombre est calculée selon une grille régulière avec une résolution modifiable, elle ne permet pas de lier l'ombre aux objets de la ville sémantiquement définis.

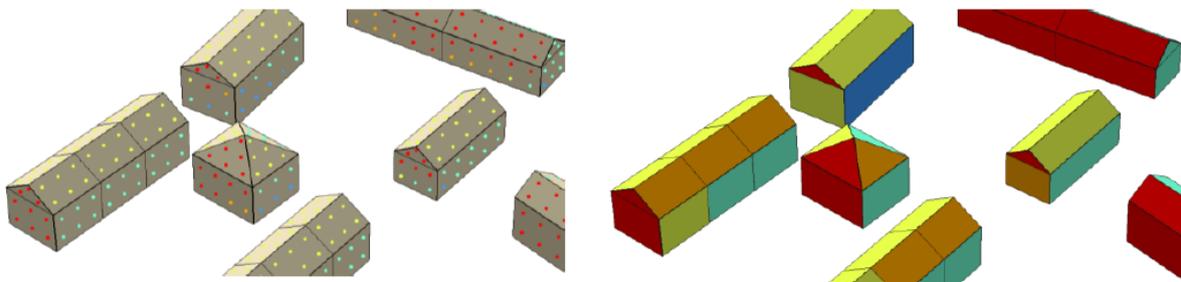


Figure 24: Etude d'ensoleillement sur des bâtiments 3D grâce à une grille régulière placée sur chaque face. Un résultat est généré sur chaque point de cette grille puis un résultat global par face est généré. (Image extraite de [WNMW15])

[ACZO16] proposent d'étudier l'influence des niveaux de détails sur le calcul d'ombre d'un modèle de ville 3D. Leur méthode de calcul d'ombre est hautement adaptable car elle permet notamment de choisir entre différents intervalles de temps pour les positions du soleil et différentes résolutions d'objets (qui peuvent être différentes entre les objets impactés par l'ombre et ceux qui la créent). Ils considèrent le ciel comme un dôme qu'ils divisent en patches. Dans une première étape, ils calculent la partie visible du ciel pour chaque point des bâtiments. Pour ce faire, ils effectuent un lancer de rayons par triangle et pour chaque patch du ciel en utilisant une structure en kd-Tree. Ils calculent et stockent une valeur de Sky View-

Factor (SVF) (la proportion de ciel dans une vue donnée, c'est une notion définie par [WJ87]) pour chaque patch de ciel et chaque triangle pour lequel le rayonnement solaire est calculé. Après cela, ils calculent les positions du soleil et obtiennent les SVF du patch de ciel actif (où se trouve le soleil) afin de calculer le rayonnement solaire correspondant. Cette méthode est flexible en termes de période temporelle et de résolution d'objets, interopérable et propose une solution pour accélérer le calcul, mais elle se concentre uniquement sur les bâtiments et sur leur potentiel photovoltaïque et ne permet pas de mesurer les impacts en ombres.

Pour résumer, la plupart des méthodes présentées ne traitent que des problèmes liés à la visualisation des ombres (principalement dans le rendu visuel) ou au calcul du rayonnement solaire pour des analyses d'énergie ou des évaluations du potentiel photovoltaïque. Aucune n'est intéressée par le calcul et l'analyse de l'impact de l'ombre des objets de la ville. En outre, la plupart d'entre elles ne considèrent que les bâtiments, voir le terrain pour certains. Elles ne proposent pas de gestion générique des données permettant de manipuler tous les objets que l'on peut retrouver dans un modèle virtuel de la ville. De plus, la plupart des applications sont appliquées sur de petites zones car elles se concentrent principalement sur des objets voisins et non sur la ville entière. Cependant, l'aspect temporel est fréquemment considéré car les calculs du soleil sont souvent effectués sur des périodes temporelles.

3. Enrichir le modèle virtuel de la ville

Nous allons présenter dans ce chapitre des algorithmes conçus et développés au cours de cette thèse dans le but d'enrichir le modèle virtuel 3D de la ville. Nous commencerons par présenter nos méthodes permettant d'améliorer ce modèle à partir de jeux de données hétérogènes contenant des informations complémentaires. Puisque ces méthodes viendront enrichir un modèle 3D déjà très lourd à manipuler, nous nous intéresserons ensuite à nos propositions de structures de données permettant de faciliter l'organisation et l'utilisation de ce modèle complexe en termes de géométrie mais également de sémantique.

3.1 Améliorer les modèles 3D

Nous cherchons à améliorer et compléter un modèle 3D de ville déjà existant. Nous proposons ici d'utiliser un modèle usuel composé d'un modèle numérique de terrain texturé et de bâtiments également texturés et modélisés selon le LoD2 du standard CityGML (ou un niveau de détail équivalent) (Figure 25). Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) est constitué de triangles non typés (nous ne savons pas s'ils représentent de la terre, une route, ou de la pelouse par exemple) et les bâtiments sont donc modélisés par un toit 3D et les murs correspondant à son enveloppe extérieure projetée verticalement vers le sol. Les méthodes présentées se basent donc sur ce niveau de détail, qui est le plus répandu parmi les modèles mis à disposition par les collectivités en open data, mais elles fonctionnent également pour le LoD 1. Les LoD 3 et 4 font intervenir de nouveaux éléments qui nécessiteront une adaptation de nos méthodes.



Figure 25: Une vue du modèle 3D de la ville de Lyon, composé d'un MNT et de bâtiments LoD2 texturés.

Les méthodes présentées dans cette section ont permis, lors de leurs conceptions, des échanges riches et réguliers avec la Métropole de Lyon, intéressée par les problématiques soulevées.

3.1.1 Reconstruction de modèles 3D de bâtiments sémantiquement enrichis par le cadastre

Cette section reprend des éléments présentés dans l'article :

Pedrinis, F., & Gesquière, G. (2017). "Reconstructing 3D Building Models with the 2D Cadastre for Semantic Enhancement". In Advances in 3D Geoinformation (pp. 119-135). Springer International Publishing.

3.1.1.1 Présentation de la problématique

Les bâtiments de ce modèle virtuel ont été modélisés en 3D et sont définis en tant qu'objets urbains « bâtiments » contenant un ensemble d'objets « toits » et « murs ». La notion de « bâtiments » n'est cependant pas ici forcément correctement définie. Les méthodes de génération de ces objets 3D utilisent des relevés à grande échelle qui permettent de repérer les zones correspondant à des bâtiments et d'en modéliser une géométrie 3D. Nous pouvons ainsi relever dans de tels modèles des objets « bâtiments » correspondant à une unique construction, tandis que d'autres représentent tout un quartier d'habitations. La découpe en objets distincts de ces géométries identifiées dépend de chaque méthode employée, et est donc faite de manière imprévisible et peu exploitable.

Néanmoins, de manière plus globale les modèles virtuels de ville actuels nécessitent une définition plus précise de leurs éléments afin de faciliter leur compréhension et leur manipulation. Il paraît par exemple plus pertinent de communiquer autour de résultats

lorsqu'il est possible de les agréger selon une adresse ou une parcelle, plutôt que de donner un groupement de triangles dont l'ensemble forme un objet indéfini pouvant s'étendre sur plusieurs constructions distinctes.

La Figure 26 illustre le fait que la définition sémantique des objets, tels que les bâtiments, peut se faire de multiples manières ; il convient donc de déterminer quelle définition est à utiliser et comment l'appliquer à la géométrie 3D afin de permettre l'utilisation et la compréhension du modèle urbain.

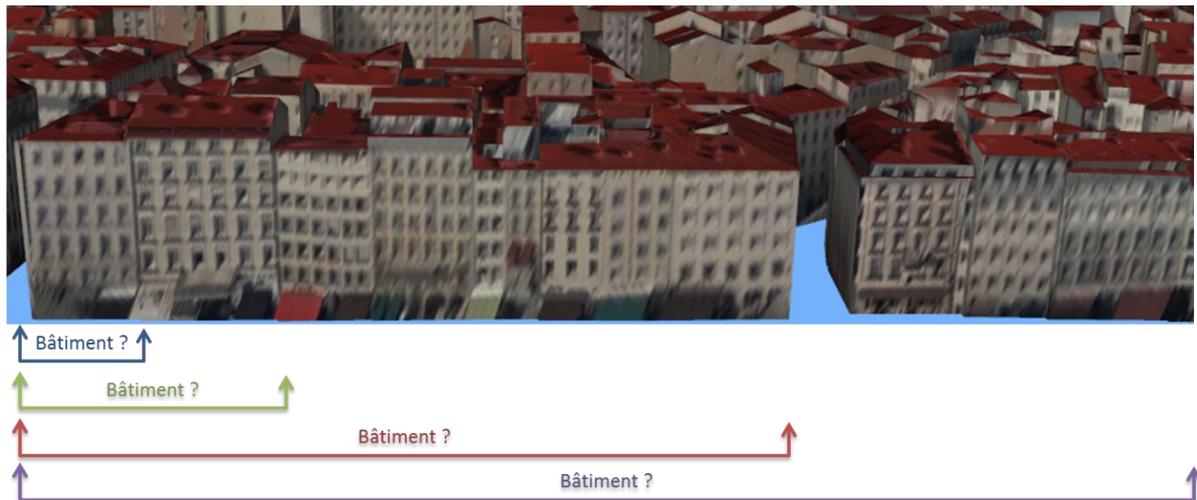


Figure 26 : A partir d'une même géométrie 3D, il est possible de définir sémantiquement de multiples manières les objets tels que les bâtiments dans le modèle urbain.

Nous avons décidé d'utiliser la définition proposée par le cadastre. Le cadastre est un document officiel dressant l'état de la propriété foncière d'un territoire qui répertorie tous les bâtiments d'un territoire en les représentant par leurs emprises au sol. Il associe également un ensemble d'informations sémantiques à chacun de ses éléments (exemple : adresse, propriétaire, etc.), et l'identifiant cadastral lié à chaque élément est souvent utilisé comme référence dans des données externes. Il peut donc être important de pouvoir lier cet identifiant aux modèles 3D de bâtiments correspondants afin de pouvoir accéder a posteriori à toutes ces informations depuis la maquette 3D.

Ce choix d'utiliser le cadastre possède cependant plusieurs inconvénients. Nous n'avons pas l'information qui nous permettrait de déterminer la validité locale de ce cadastre, encore moins à la période d'acquisition du modèle 3D. Nous prenons donc le risque de chercher à mettre en relation des données qui ne correspondent pas parfaitement puisque générées avec des méthodes et à des temporalités différentes. A l'heure actuelle, cela représente cependant à nos yeux le meilleur compromis puisque son caractère officiel lui assure une certaine exhaustivité qui ne sera par exemple par présente dans des données communautaires. De plus,

son accessibilité et sa mise à jour régulière permet une utilisation flexible avec des jeux de données externes qui évoluent également. Malheureusement, à notre connaissance il n'existe pas de cadastre numérique millésimé qui permettrait d'assurer une certaine cohérence vis-à-vis des modèles urbains et des éléments de la ville du passé. Il sera ainsi difficile de lier un modèle 3D historique représentant un bâtiment aujourd'hui détruit avec le cadastre puisqu'il ne sera probablement plus disponible en version numérique.

Néanmoins, la méthode proposée n'est pas contrainte par le jeu de données 2D utilisé et il serait donc possible de remplacer le cadastre par tout autre jeu d'emprises au sol jugé plus pertinent.

Il est nécessaire de pouvoir lier les géométries 3D avec les emprises cadastrales mais cette agrégation n'est pas forcément évidente. La Métropole de Lyon a ainsi initié cette mise en relation afin de générer une nouvelle maquette 3D contenant les bâtiments définis dans le cadastre. Cette procédure manuelle est cependant fastidieuse et a nécessité de nombreuses semaines à des experts pour traiter un territoire de plus de 500 km². De plus, les résultats dépendaient de l'opérateur ayant eu à traiter un territoire donné car certains cas complexes peuvent être soumis à interprétation.

C'est pourquoi nous avons développé une méthode permettant de lier automatiquement le modèle 3D avec le cadastre (ou tout autre jeu de données 2D proposant une découpe pertinente du territoire, et surtout des bâtiments qui s'y trouvent). Cela permet de reconstruire un modèle 3D contenant des bâtiments sémantiquement enrichis, ayant une définition justifiée et possédant un ensemble d'attributs les décrivant, dont l'identifiant cadastral qui permet l'obtention d'informations externes par simple jointure. Cette méthode permettra ainsi de générer des résultats bien plus rapidement que le traitement manuel, et éviterait les éventuelles divergences d'interprétation apportées par des opérateurs humains.

Cette mise en relation est illustrée dans la Figure 27 avec la représentation d'une même zone dans le modèle 3D à gauche, et dans le cadastre à droite.

Afin de pouvoir mettre en relation ces deux jeux de données, la première condition est que leurs géométries soient définies dans le même système de référence spatial, mais la conversion d'un système à l'autre est généralement connue et ce point ne pose donc normalement pas de problème.

Pour chaque entité « bâtiment » du modèle 3D, plusieurs bâtiments du cadastre peuvent correspondre. La solution proposée consiste à partitionner la géométrie 3D afin de générer un nouveau modèle pour chaque emprise au sol du cadastre. La géométrie et les coordonnées de

texture sont extraites des bâtiments 3D initiaux et ne seront pas modifiées, nous cherchons seulement à les découper selon les emprises des objets définis par le cadastre. Nous allons illustrer le fonctionnement de la méthode sur les objets modélisés dans la Figure 28.

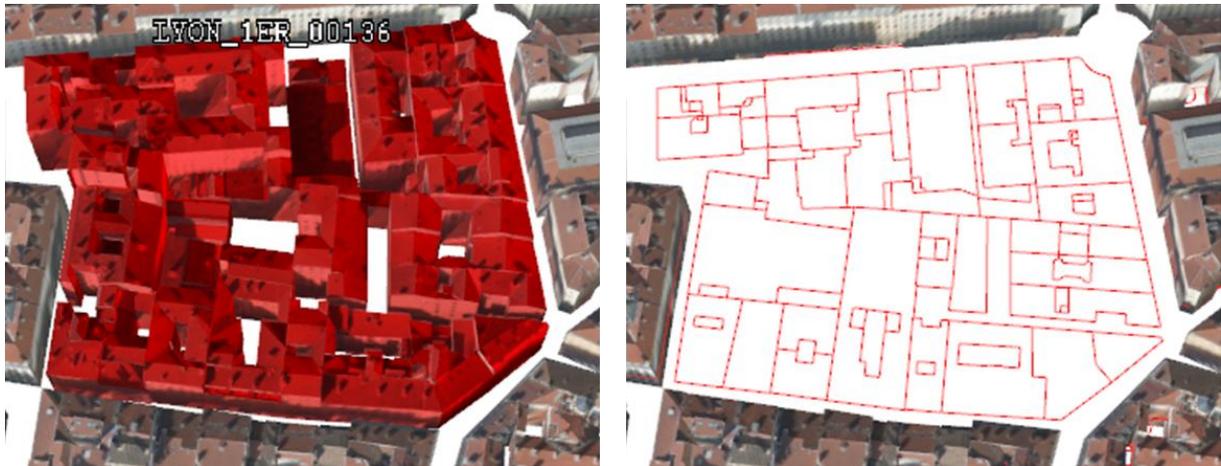


Figure 27: A gauche : un unique objet défini comme bâtiment dans le modèle 3D est sélectionné en rouge. A droite : le cadastre correspondant avec les emprises au sol des différents bâtiments qui y sont définis. (Données issues du site de la Métropole de Lyon⁴⁰)

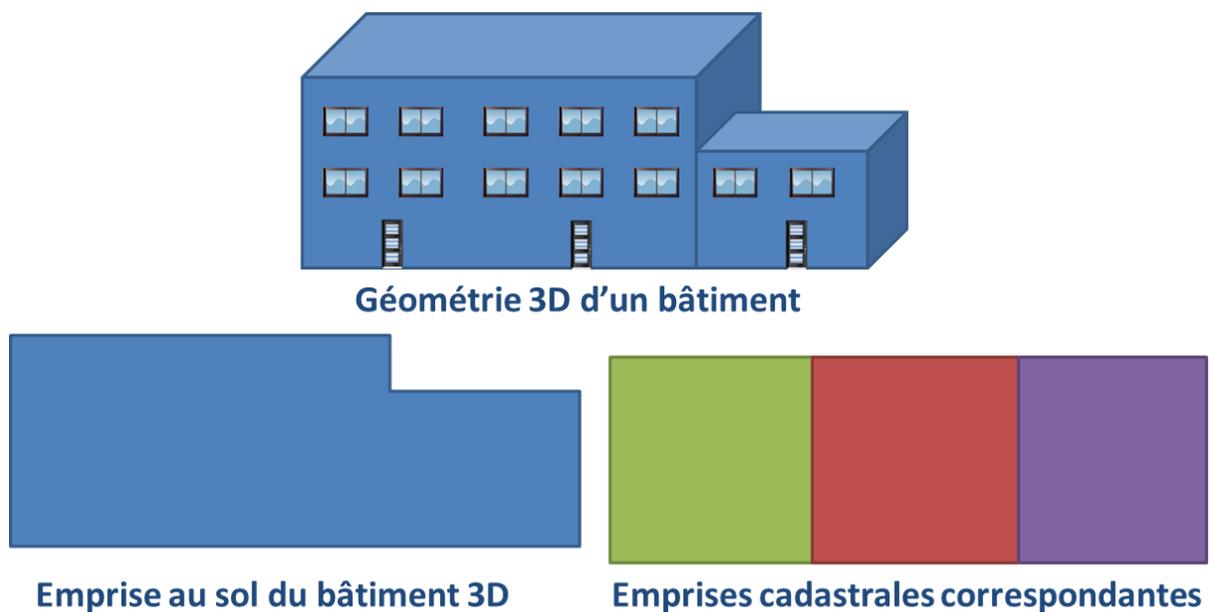


Figure 28: Cas d'étude simple de mise en relation d'une géométrie 3D d'un bâtiment avec les emprises cadastrales correspondantes.

Nous devons donc corriger les polygones représentant les bâtiments dans le cadastre afin de les faire recouvrir complètement les emprises au sol des modèles 3D, et ainsi permettre leur partitionnement. En effet, puisque les bâtiments sont modélisés selon le LoD2 du standard

⁴⁰ <https://data.grandlyon.com/localisation/maquette-3d-texturfe-de-larrondissement-de-lyon-1er-la-mftropole-de-lyon/>

CityGML, cela signifie que les murs sont modélisés uniquement par des plans verticaux correspondants aux bords des toits. Ainsi, le fait de recouvrir leurs emprises au sol signifie pouvoir affecter entièrement leurs géométries qui y sont entièrement incluses. Cependant, en regardant dans le détail les images de la Figure 27, nous pouvons déjà identifier certaines incohérences, notamment au niveau de l'absence de certaines cours intérieures dans le cadastre. Cela reflète le fait que les deux jeux de données ne se superposent pas correctement. Nous illustrons cette observation dans la Figure 29, qui met bien en avant la superposition imparfaite des emprises au sol des deux jeux de données précédemment présentés.

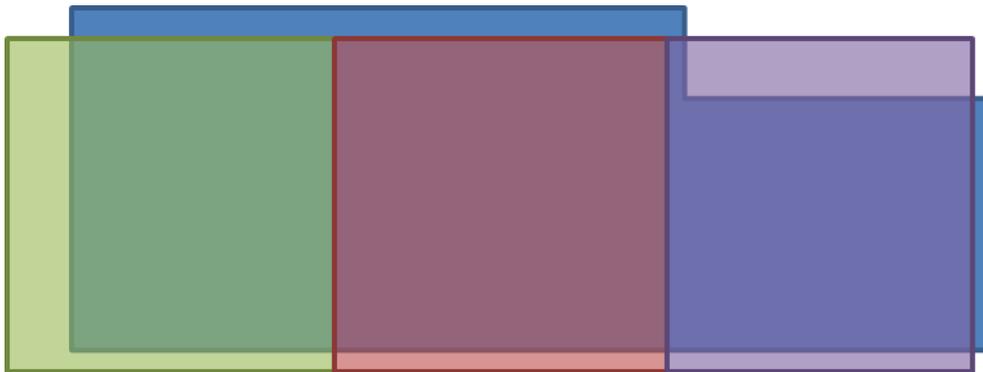


Figure 29: Exemple d'incohérences entre l'emprise au sol du cadastre (verte, rouge et violette) et celle du modèle 3D correspondant (bleu).

Comme nous l'avons introduit précédemment, il existe plusieurs facteurs de différences entre ces deux jeux de données hétérogènes. Une cause potentielle est liée à la précision qui n'est pas forcément la même pour les deux ensembles de données. Une deuxième source de différences est liée aux dates d'acquisition qui peuvent différer entre les deux jeux de données, or les bâtiments ont pu évoluer entre ces deux dates. Troisièmement, ces méthodes d'acquisition ne sont tout simplement pas comparables. Le cadastre est localement mis à jour manuellement par des géomètres dans certaines circonstances précises (par exemple lors d'un litige de voisinage, d'une cession ou pour la vérification des limites de propriété), alors que le modèle 3D est souvent généré entièrement lors d'une acquisition réalisée à une période donnée et dont le traitement est en grande partie automatisé.

Il peut ainsi y avoir des différences prévisibles entre les emprises au sol des bâtiments des deux jeux de données. Par exemple, les murs et donc l'emprise au sol d'un bâtiment modélisé selon le LoD 2 sont définis par la forme de son toit. Or, comme nous pouvons le voir sur l'illustration de la Figure 30, il existe des cas fréquents de bâtiments où ces emprises ne sont pas pertinentes, lorsqu'il y a un décalage entre le mur et la bordure du toit.

Le bâtiment est alors plus large qu'il ne devrait l'être contrairement à sa représentation dans le cadastre qui utilise normalement les murs réels. Même si l'emprise du cadastre peut

probablement être considérée comme la représentation la plus réaliste dans ces cas particuliers, notre objectif ici consiste uniquement à diviser la géométrie 3D en la liant avec les emprises cadastrales. Nous ne cherchons pas à déterminer quelle représentation est la plus juste, nous avons juste besoin de faire correspondre les polygones du cadastre avec la géométrie 3D afin de pouvoir lui appliquer la sémantique associée. Cependant, dans un cadre de validation de la donnée et de réflexion sur la stratégie à adopter pour de futurs relevés et acquisitions (pour le modèle 3D ou pour le cadastre), il serait possible de s'intéresser plus précisément à ces différences.

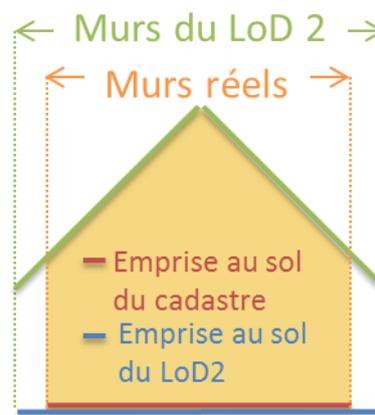


Figure 30 : Incohérence possible entre les emprises au sol du cadastre et d'un bâtiment modélisé selon le LoD 2 du standard CityGML.

En tentant de découper les modèles 3D de bâtiments selon les emprises cadastrales originales, le résultat ne serait pas satisfaisant puisque ces emprises ne coïncident pas parfaitement avec la géométrie 3D. Dans le cas où le bâtiment du cadastre se révélerait plus vaste que celui du modèle 3D, nous ne serions pas en mesure de générer la géométrie 3D texturée manquante. Et dans le cas inverse, si nous choissions de simplement ignorer les parties du modèle 3D ne correspondant à aucune emprise cadastrale, nous perdriions de l'information géométrique. De plus, cela nécessiterait de générer des murs pour fermer les bâtiments et, outre la légitimité discutable d'un tel choix (nous n'avons aucune certitude sur le fait que le cadastre est plus juste sur le bâtiment concerné que le modèle 3D), il serait compliqué de générer des textures sur ces nouveaux murs ainsi décalés.

Sur le jeu de données du premier arrondissement de la ville de Lyon, nous avons mesuré que la proportion de géométrie 3D non recouverte par les polygones du cadastre représente environ 8% de la surface totale des emprises au sol des bâtiments. En utilisant directement le cadastre lors de la découpe, nous perdriions ainsi une part importante du modèle 3D puisque

ces pertes concernent principalement l'enveloppe externe des bâtiments, ce qui constitue la partie la plus visible.

Un autre problème qui peut apparaître avec une découpe brute est la différence entre une séparation visible entre deux bâtiments sur le modèle 3D et la division correspondante définie dans le cadastre. Un cas simple est illustré dans la Figure 31. La découpe d'un bâtiment est générée avec les emprises inchangées du cadastre (à gauche) alors que la découpe attendue est présentée à droite. L'obtention du second résultat nécessiterait d'adapter les emprises cadastrales selon la géométrie 3D afin de prendre en compte les éventuelles frontières identifiables sur le modèle 3D.

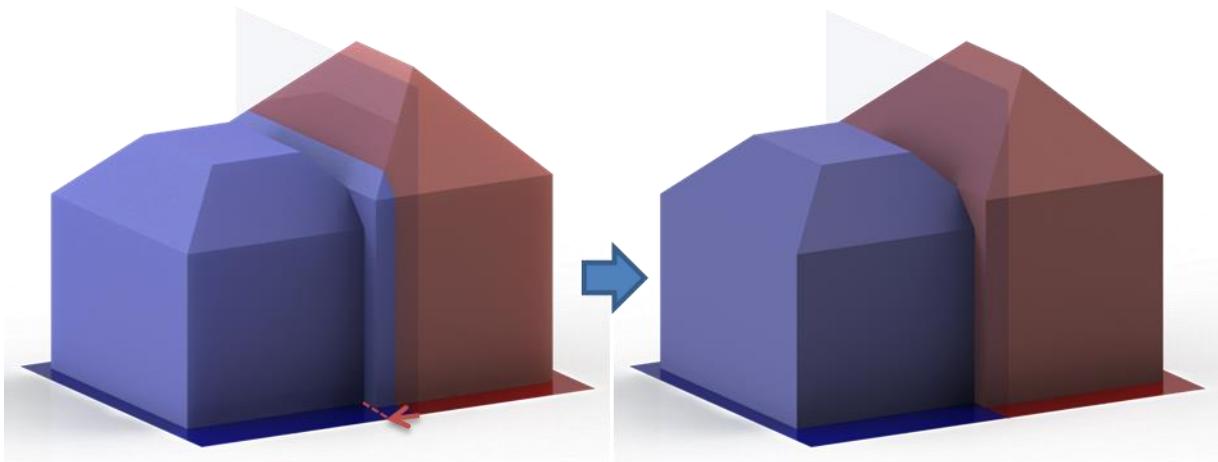


Figure 31 : A gauche : deux emprises cadastrales découpent un bâtiment 3D. Une correction de ces polygones est nécessaire afin d'obtenir le résultat visuellement plus satisfaisant de droite.

Ces différentes contraintes doivent être prises en compte afin d'adapter les emprises au sol des bâtiments du cadastre au modèle 3D que l'on cherche à découper. Une fois modifiées pour correspondre au mieux à la géométrie 3D, ces emprises seront utilisées afin de la partitionner en bâtiments distincts. Chaque bâtiment aura ainsi une géométrie 3D texturée, et l'ensemble des informations sémantiques contenues dans le cadastre lui seront ensuite liées.

La Figure 32 présente les différentes étapes de la méthode que nous avons mise en place afin de répondre à cette problématique. Ces différentes étapes seront présentées en détail dans les sections 3.1.1.2 à 3.1.1.4.

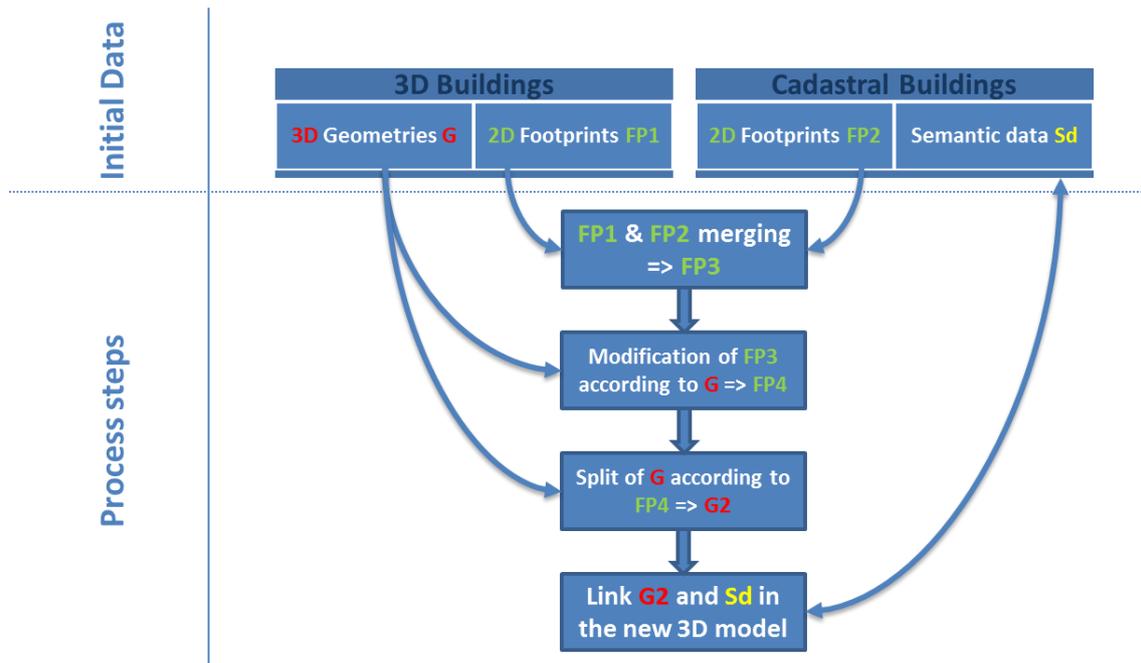


Figure 32: Présentation des principales étapes de notre méthode permettant d'améliorer des modèles 3D de bâtiments avec le cadastre.

Cette figure introduit également des notations qui seront utilisées par la suite. G est un ensemble de géométries 3D modélisant des bâtiments. Ces géométries sont utilisées pour générer des polygones 2D correspondants aux emprises au sol de ces bâtiments (FP1), en projetant au sol les polygones de toits. De l'autre côté, l'ensemble des polygones FP2 représente les emprises au sol des bâtiments définis par le cadastre. Chaque emprise peut posséder des informations sémantiques Sd (identifiant cadastral, adresse, etc.).

La première étape du processus consiste à fusionner les deux ensembles d'emprises pour en générer un nouveau : FP3. Il représente les polygones de FP2 remodelés afin de couvrir entièrement la surface de FP1 et ainsi éviter la perte d'une partie du modèle 3D. Les géométries 3D de G sont ensuite utilisées afin de modifier les polygones de FP3 en adaptant les frontières entre emprises voisines selon la géométrie 3D associée. Cette étape permet de traiter le cas présenté dans la Figure 31. Ce nouvel ensemble de polygones représentant les emprises au sol des futurs bâtiments s'appelle FP4. Il est alors possible de générer un nouvel ensemble de géométries 3D G2 en découpant G selon les emprises de FP4. Chaque géométrie de G2 correspond maintenant à un objet bâtiment possédant son propre identifiant cadastral. Un lien naturel vers Sd est ainsi disponible et G2 peut accéder aux données sémantiques proposées initialement par le cadastre, ainsi que celles de données externes se référant à l'identifiant cadastral.

3.1.1.2 Modification des emprises cadastrales pour une mise en relation avec le modèle 3D

La section précédente a souligné la nécessité d'adapter les polygones issus du cadastre aux emprises générées depuis les modèles 3D de bâtiments. Nous avons deux ensembles de polygones 2D, FP1 et FP2, et nous désirons générer un nouvel ensemble de polygones FP3 qui contiendra les emprises de FP2 modifiées afin de couvrir toute la surface des polygones de FP1. Pour l'exemple représenté sur l'image de gauche de la Figure 29, cela signifie que les polygones verts, rouges et violets du cadastre couvriront entièrement le bleu qui représente l'emprise au sol du modèle 3D.

Pour ce faire, nous commençons par calculer la différence entre FP1 et FP2 pour produire un ensemble de polygones Diff, illustré en orange dans la Figure 33 qui se réfère à l'exemple précédemment présenté dans la Figure 28, où FP1 correspond au polygone bleu et FP2 aux polygones vert, rouge et violet. Ces polygones Diff correspondent à la surface de FP1 qui n'était initialement pas couverte par FP2, et qui aurait donc été perdue avec une découpe immédiate.



Figure 33: En orange : différence entre l'emprise du bâtiment 3D initial et les emprises cadastrales.

Ces polygones Diff représentent les zones de FP1 dans lesquelles les polygones FP2 vont croître. Cependant, cette expansion doit être contrôlée : le résultat doit être visuellement convainquant puisqu'il définira le contour des futurs modèles 3D de bâtiments. Bien que certains cas soient évidents (comme Diff2 qui doit être assimilé à l'emprise violette), d'autres sont plus complexes et demandent un traitement particulier. En effet, nous pouvons voir que Diff1 est voisin avec de multiples emprises cadastrales. Le but est de recouvrir le polygone par ses voisins, mais cela nécessite un partitionnement crédible de ce polygone afin que les emprises étendues conservent une forme cohérente. Chaque polygone Diff est ainsi divisé en fonction des polygones voisins de FP2, afin de générer la meilleure forme possible pour

chacun d'entre eux. Nous avons pour cela mis en place des critères d'affectation que nous présentons ci-dessous.

Cela débute par la détection des points de Diff qui se situent à la limite de deux emprises cadastrales voisines (points blancs de la Figure 33). Ces points seront utilisés pour diviser Diff en polygones distincts qui seront ensuite affectés aux emprises cadastrales concernées. Nous allons nous intéresser au traitement de l'un de ces points que nous nommons P. Cette étape est illustrée dans la Figure 34.

Un segment passant par P qui prolonge la ligne de frontière entre deux emprises cadastrales voisines doit être défini afin de diviser le polygone Diff en deux parties et étendre ces emprises de manière visuellement crédible. Pour atteindre cet objectif, P est projeté orthogonalement sur les autres arêtes du polygone de Diff et la meilleure projection P' est choisie selon des paramètres de distance et d'angle.

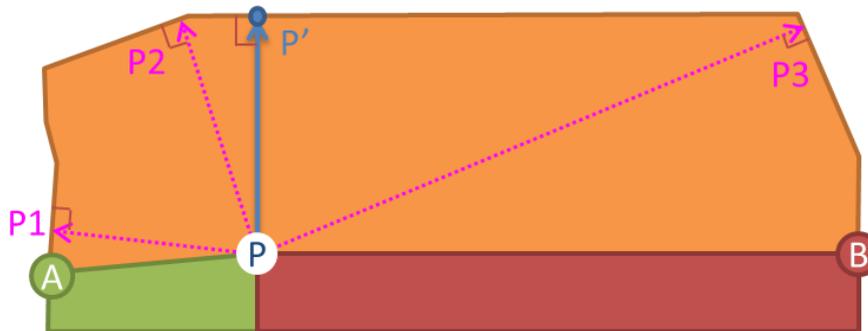


Figure 34: Utilisation du point P pour diviser le polygone orange en deux polygones distincts qui seront ensuite assimilés aux deux polygones verts et rouges. Plusieurs scénarios de découpe sont envisagés, la solution retenue correspond à P' qui est proche de P et qui évite la création de saillances.

En effet, pour obtenir une extension crédible des polygones du cadastre, les angles entre [PP'] et les deux bords voisins de P [PA] et [PB] doivent avoir des valeurs proches (afin d'éviter des saillances) et le segment [PP'] doit être aussi court que possible (afin d'éviter des formes inutilement complexes). Dans l'exemple de la Figure 34, les projections P2 et P3 sont jugées moins pertinentes que P' et P1 en raison de leurs distances à P trop importantes. P1 est lui rejeté parce que les angles $\widehat{APP1}$ et $\widehat{P1PB}$ seraient trop disproportionnés et les polygones résultants ne seraient visuellement pas crédibles puisqu'ils sont censés représenter des bâtiments, qui ont rarement des formes torturées. P' est ainsi choisi puisqu'il offre le meilleur compromis. Ces critères de forme ont été mis en place sur des jeux de tests afin de prendre en compte le plus de cas particuliers possibles. La ligne définie par P et P' est ensuite utilisée pour diviser Diff en deux polygones.

La dernière étape de ce processus consiste alors à affecter chaque sous-polygone à l'emprise cadastrale la plus proche pour l'étendre. L'emprise choisie correspond à celle avec laquelle le polygone partage la bordure commune la plus longue. Ce processus appliqué sur l'exemple de la Figure 33 fournit le résultat présenté dans la Figure 35.

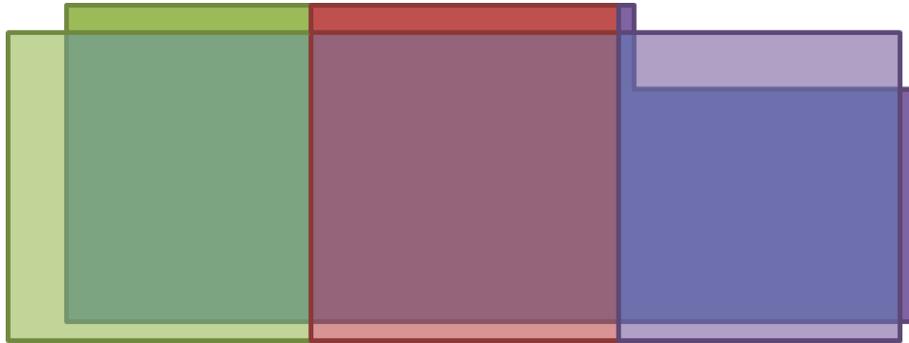


Figure 35: Le polygone Diff1 de la Figure 33 a été partitionné selon ses emprises cadastrales voisines. Les polygones ainsi obtenus sont alors assignés aux emprises correspondantes.

Des emprises cadastrales couvrant entièrement FP1 sont maintenant disponibles, mais elles ne concordent pas encore parfaitement : certaines parties de ces polygones ne sont pas présentes dans FP1 et ne sont donc pas nécessaires puisqu'elles ne correspondent à aucune géométrie 3D de G. Elles sont donc éliminées en calculant l'intersection entre les polygones des emprises cadastrales modifiées et l'emprise FP1 du modèle 3D afin d'éliminer les zones superflues. Ce dernier résultat illustré dans la Figure 36 correspond à FP3 selon les notations définies dans la Figure 32. Il représente l'emprise au sol exacte de la géométrie 3D G, partitionnée selon les différents bâtiments définis par le cadastre.

Le calcul d'intersection ainsi que toutes les opérations réalisées sur les données vectorielles 2D présentées dans ce manuscrit sont réalisées à l'aide de la librairie GDAL⁴¹.

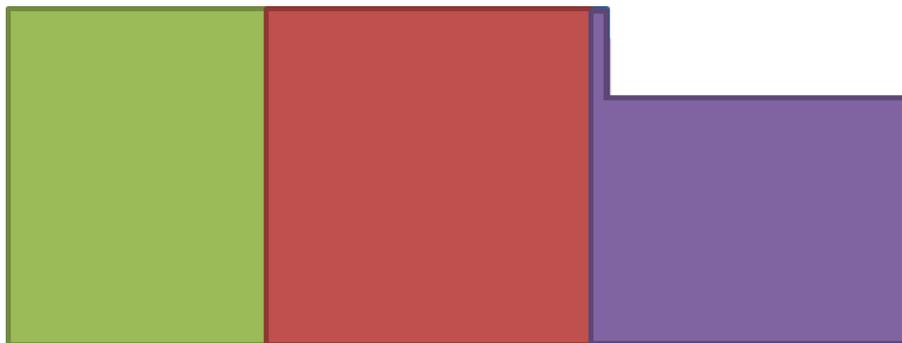


Figure 36: L'emprise au sol exacte de la géométrie 3D G, partitionnée selon les emprises au sol du cadastre correspondantes.

⁴¹ <http://www.gdal.org/index.html>

3.1.1.3 Correction des emprises au sol pour prendre en compte la géométrie 3D

Cet ensemble de polygones FP3 suffirait à découper le modèle 3D puisque ces emprises couvrent maintenant toute la surface de FP1. Cependant, comme nous l'avons introduit précédemment, cette découpe du modèle 3D ne serait probablement pas visuellement satisfaisante car elle ne prendrait pas en compte la géométrie 3D de ce modèle. Les bâtiments générés ne seraient potentiellement pas crédibles puisque les éventuelles discontinuités du toit pouvant être caractéristiques d'un changement de bâtiment ne seront alors pas prises en compte. La Figure 37 illustre ceci en représentant la géométrie 3D découpée par les polygones FP3 de l'exemple précédent.

Il apparaît clairement que le bâtiment rouge semble tronqué par le bâtiment violet qui empiète sur sa géométrie. Ce constat visuel repose principalement sur la différence de hauteurs entre la majeure partie du bâtiment violet, et cette fine bande voisine au bâtiment rouge. La frontière vraisemblable entre ces deux bâtiments semble plutôt être le mur vertical séparant ces deux surfaces de toits discontinues.



Figure 37: La géométrie 3D initiale découpée en trois bâtiments distincts selon les emprises du cadastre modifiées afin de recouvrir les emprises de ce modèle 3D.

Afin d'améliorer la découpe, nous devons donc utiliser l'information véhiculée par la géométrie des toits pour proposer une nouvelle version des emprises de bâtiments. Les polygones de FP3 doivent donc être retravaillés en fonction des discontinuités du toit, qui se traduisent par la présence de murs verticaux séparant deux niveaux de toit.

Nous commençons donc par découper les polygones de FP3 selon les éventuels murs qui se trouvent à l'intérieur (contrairement à ceux qui définissent leurs contours). Dans l'exemple de l'image de droite de la Figure 36, cela signifie que l'emprise polygonale violette est partagée en deux selon le mur du modèle 3D (Figure 38).



Figure 38: Les emprises au sol précédemment générées sont découpés selon les murs qui s’y trouvent dans le modèle 3D.

Pour chaque élément de FP3, nous obtenons alors un ensemble de sous-polygones (potentiellement composé d’un unique élément en l’absence de murs intérieurs). Parmi cet ensemble, nous avons constaté que les polygones caractéristiques d’incohérences visuelles lors de la découpe possèdent une forme peu étendue et/ou allongée : ils correspondent à des emprises empiétant sur leurs voisins (le polygone allongé violet dans la Figure 38). Nous appelons ces polygones Sp , et nous devons déterminer lesquels doivent être réaffectés à une autre emprise voisine afin de corriger les incohérences visuelles.

L’identification des polygones Sp est réalisée en utilisant deux paramètres : leur surface et leur coefficient de compacité de Gravelius (Kg). Le calcul du second paramètre Kg pour un polygone P est réalisé grâce à la formule suivante :

$$Kg(P) = \frac{Perimètre(P)}{2 * \sqrt{\pi * Aire(P)}}$$

Ce coefficient, initialement utilisé pour analyser les bassins hydrographiques [PP11], est égal à 1 si P représente un cercle parfait, et est inversement proportionnel à la compacité du polygone (Figure 39). Ce paramètre permet donc de détecter les polygones allongés qui nous intéressent ici.

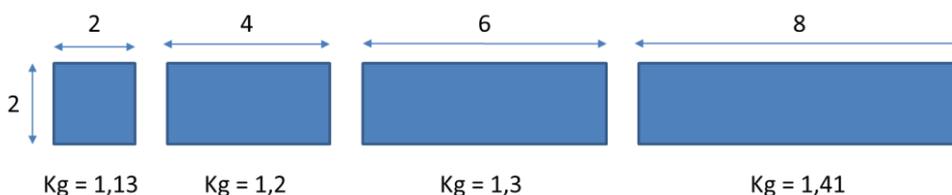


Figure 39: Quelques valeurs du coefficient de compacité de Gravelius pour des polygones simples.

Chacun des polygones Sp est ensuite comparé aux emprises voisines de FP3. Le polygone est alors réaffecté à l’emprise avec laquelle il partage la bordure continue la plus longue. Dans l’exemple précédent, l’unique polygone Sp détecté est assigné au bâtiment rouge (Figure 40).

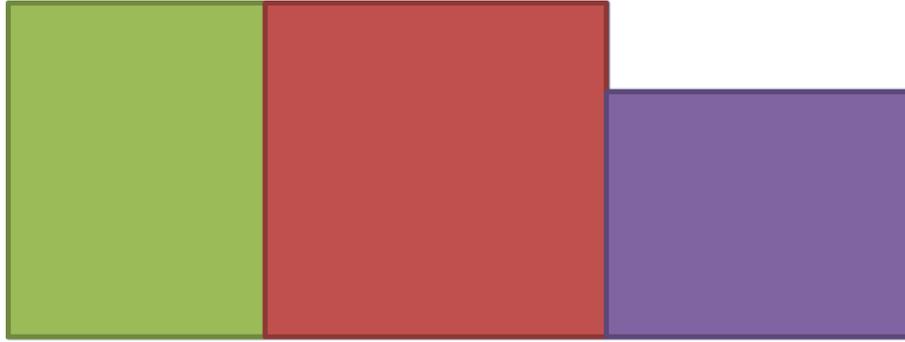


Figure 40: Emprises au sol résultantes. Ces polygones représentent FP4.

Ces nouvelles emprises polygonales forment l'ensemble de polygones FP4 qui est ensuite utilisé afin de découper la géométrie 3D des bâtiments et reconstruire un modèle 3D pour chaque emprise cadastrale.

3.1.1.4 Reconstruction des modèles 3D de bâtiments

Chaque emprise stockée dans FP4 représente un bâtiment défini par le cadastre. Nous souhaitons créer un nouveau modèle 3D texturé contenant tous ces bâtiments, ce qui signifie que nous devons générer une géométrie 3D G2 pour chacun d'eux. Nous découpons donc la géométrie 3D de G en fonction des emprises de FP4, avant d'attribuer les géométries résultantes aux emprises concernées dans des objets urbains définis dans le modèle 3D de sortie comme étant des bâtiments (Figure 41). Les coordonnées de texture sont ensuite recalculées pour chaque géométrie en exploitant celles stockées dans le modèle 3D d'entrée. L'interpolation des coordonnées de textures pour des points qui n'existaient pas initialement de manière explicite (à cause des nouvelles frontières créées) peut amener une imprécision de un pixel près mais cette potentielle erreur nous semble négligeable au vue de la qualité des données concernées.

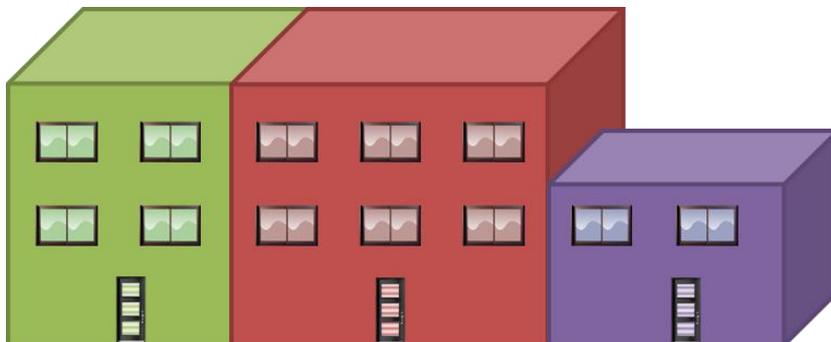


Figure 41: Modèles 3D des bâtiments définis dans le cadastre et dont la géométrie est issue du modèle 3D initial.

Cependant, les murs présents dans le modèle 3D initial ne sont plus suffisants puisqu'ils ne représentaient que le contour des bâtiments existants. Puisque ceux-ci viennent d'être

découpés, il est nécessaire de générer des murs permettant de représenter ces nouvelles frontières et ainsi avoir des bâtiments fermés indépendants les uns des autres. Nous devons donc générer des murs qui étaient cachés dans le modèle initial, pour recréer l'enveloppe fermée de chaque bâtiment et ainsi permettre une visualisation isolée de chacun d'entre eux.

Pour ce faire, nous détectons les bords de FP4 qui représentent la frontière entre deux bâtiments, et nous y créons des murs verticaux jusqu'au sol. Ces murs générés n'ont cependant pas de textures puisqu'ils sont cachés dans le modèle global.

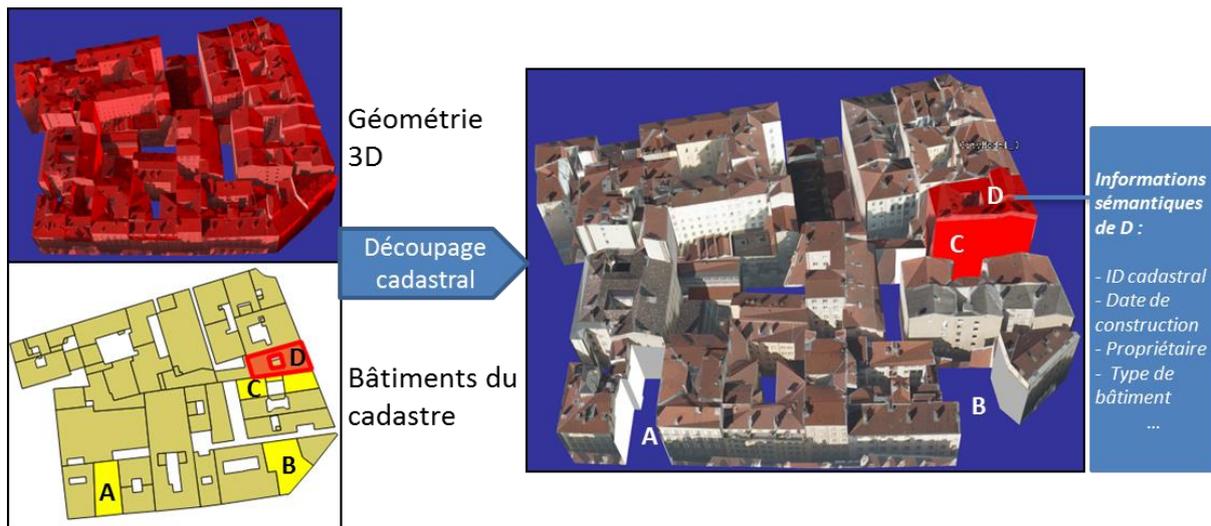


Figure 42: En haut à gauche : un objet "bâtiment" issu du modèle 3D texturé du premier arrondissement de la ville de Lyon. En bas à gauche, les emprises au sol des bâtiments définies par le cadastre. A droite, le modèle 3D découpé en un ensemble de bâtiments correspondant au cadastre qui possèdent chacun leur géométrie 3D texturée et les informations sémantiques contenues dans le cadastre. Le bâtiment D est sélectionné (en rouge), alors que A, B et C sont cachés (on voit notamment les murs intérieurs générés pour produire des géométries fermées).

Enfin, étant donné que les polygones du FP4 sont à l'origine extraits des emprises cadastrales, les informations sémantiques Sd liées sont donc attribuées au modèle 3D généré. Le résultat final de la zone introduite Figure 27 est illustré Figure 42.

3.1.1.5 Résultats et discussions

Nous présentons dans ce manuscrit les résultats avec les données de deux arrondissements de la ville de Lyon (le 1^{er} et le 4^{ème}). Le Tableau 1 donne les temps de calcul effectués sur un ordinateur possédant un CPU I7-4790K @ 4.00GHz. Tous les temps de calcul proposés dans ce manuscrit correspondront également à cette configuration. Alors que plusieurs jours de traitement manuel étaient nécessaires à un expert, le traitement automatique ne prend que quelques dizaines de minutes. Le traitement d'un territoire tel que celui de la Métropole de Lyon (550km²) est ainsi réalisé en quelques heures alors que plusieurs semaines ont été

nécessaires à des experts pour le faire manuellement. Ce gain de temps facilite notamment les mises à jours lors de l'apparition d'un nouveau cadastre ou modèle 3D.

La Figure 43 illustre un extrait des résultats sur le 1^{er} arrondissement.

Tableau 1: Temps de calcul de la méthode utilisée sur deux arrondissements de la ville de Lyon.

District (superficies)	Input CityGML file		Enhancement process	Output CityGML file	
	Number of Buildings	File size	Time	Number of Buildings	File size
Lyon 01 (1,5 Km ²)	409	110 Mb	1197 s (20 min)	2640	132 Mb
Lyon 04 (2,9 Km ²)	999	118 Mb	1461 s (24 min)	4339	148 Mb

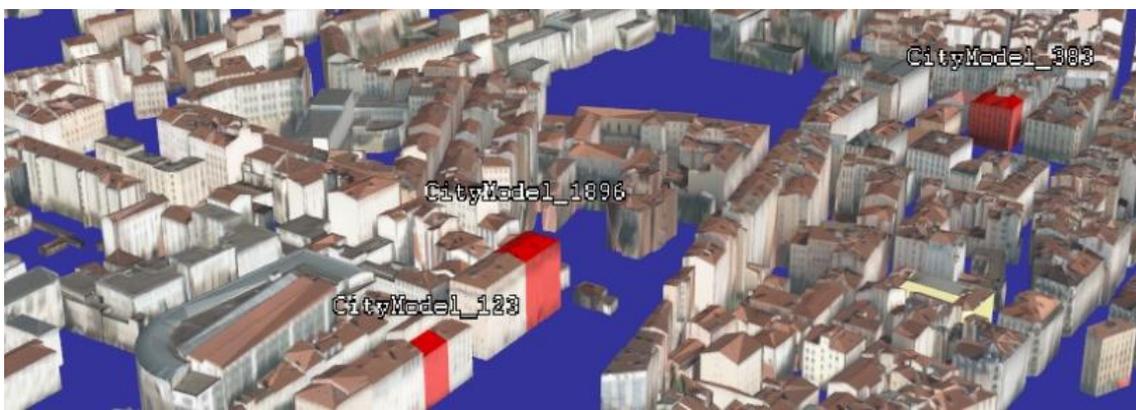


Figure 43: Modèles 3D de bâtiments sémantiquement améliorés par le cadastre reconstruits sur le 1^{er} arrondissement de la ville de Lyon. Plusieurs bâtiments individuels sont sélectionnés en rouge. (Données issues du site de la Métropole de Lyon⁴²)

Nous pouvons constater sur le Tableau 1 que le nombre de bâtiments augmente logiquement après le processus, mais cela ne signifie pas pour autant que tous les bâtiments du modèle 3D initial ou ceux du cadastre ont été conservés. Il est en effet possible que certaines emprises n'aient pas trouvé d'équivalent dans l'autre base de données à cause des différences expliquées plus tôt. Si nous considérons que le modèle 3D est plus proche de la réalité puisqu'il est acquis automatiquement et peut être plus récemment, ces différences pourraient être représentatives d'un cadastre obsolète. Il serait ainsi possible de proposer une méthode automatique de validation du cadastre pour organiser efficacement des campagnes de mise à jour de celui-ci. Cela signifie quoi qu'il en soit que la validation de cette méthode ne peut être réalisée qu'avec le concours d'experts. Nous avons par ailleurs pu analyser nos résultats avec des opérateurs de la Métropole de Lyon qui avaient réalisé une découpe similaire manuellement (pour un arrondissement tels que les deux présentés, cela représente approximativement une journée de travail pour une personne experte possédant une suite

⁴² <https://data.grandlyon.com/localisation/maquette-3d-texturfe-de-larrondissement-de-lyon-1er-la-mftropole-de-lyon/>

logicielle adéquate). Bien que les résultats semblent globalement similaires, cette étude a permis de trouver quelques cas particuliers qui ont été gérés différemment par l'expert. Ces différences sont souvent dues aux valeurs seuil utilisées qui ne sont pas adaptées à tous les bâtiments (notamment en ce qui concerne la détection des polygones Sp) et il serait donc nécessaire de mettre en place une méthode flexible permettant d'adapter ces valeurs en fonction de différents paramètres (exemple : surface de bâtiment concernée, nombre d'emprises voisines, etc.).

Cependant, un certain nombre d'incohérences sont dues à des cas ambigus pouvant amener des incertitudes même chez les opérateurs humains. De plus, les critères géométriques du toit ne sont pas forcément suffisants pour prévoir une découpe crédible des bâtiments. La Figure 44 illustre un de ces cas où notre découpe automatique cherchant à proposer une surface continue de toit propose une découpe différente de celle proposée manuellement. Les découpes reposent sur les changements de pente des toits et ce ne sont pas les mêmes qui ont été ici retenues par chaque méthode.

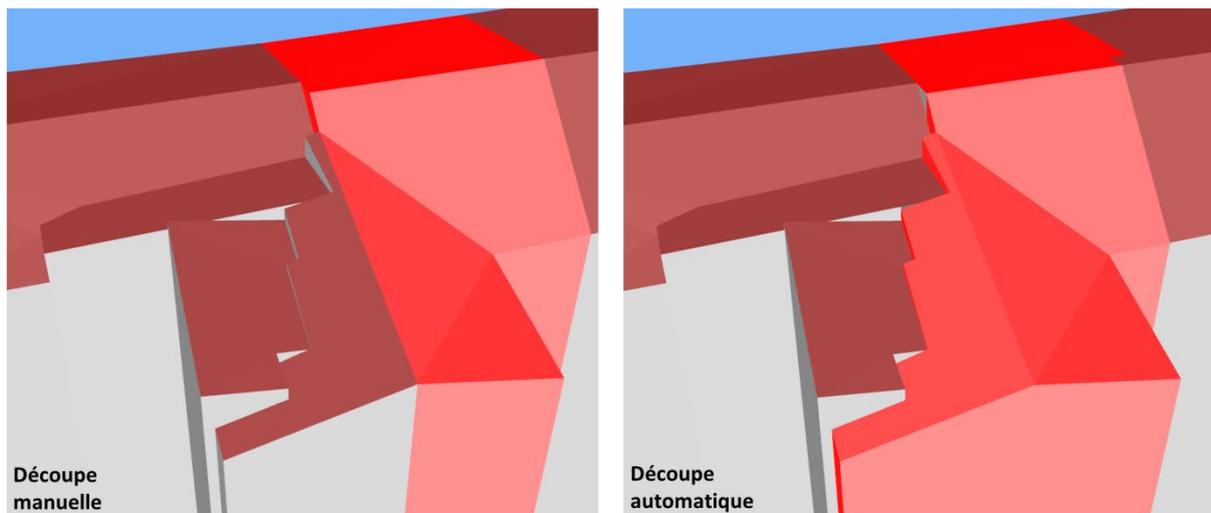


Figure 44: Exemple de différence entre une découpe manuelle et notre découpe automatique.

Après avoir échangé avec ces opérateurs ayant réalisé manuellement la découpe, nous en sommes venus à la conclusion qu'il serait effectivement nécessaire de garder une étape de validation humaine dans un processus d'amélioration globale du modèle 3D, en suivant le processus représenté à la Figure 45. Les emprises de FP4 sont toujours utilisées pour générer la géométrie 3D G2, mais un expert aurait la possibilité de détecter des incohérences dans la découpe du modèle 3D, en étant éventuellement assisté par des indicateurs d'incertitudes sur le résultat généré, et de proposer des modifications sur les polygones de FP4. Les emprises modifiées permettraient ensuite de générer une nouvelle version du modèle 3D des bâtiments,

qui sera également soumis à la validation de l'expert. Ce processus peut être répété plusieurs fois jusqu'à ce que l'expert valide le résultat. Une amélioration supplémentaire consisterait à faire de l'apprentissage automatique des corrections apportées afin de pouvoir détecter automatiquement les futurs cas similaires et directement proposer les corrections adéquates.

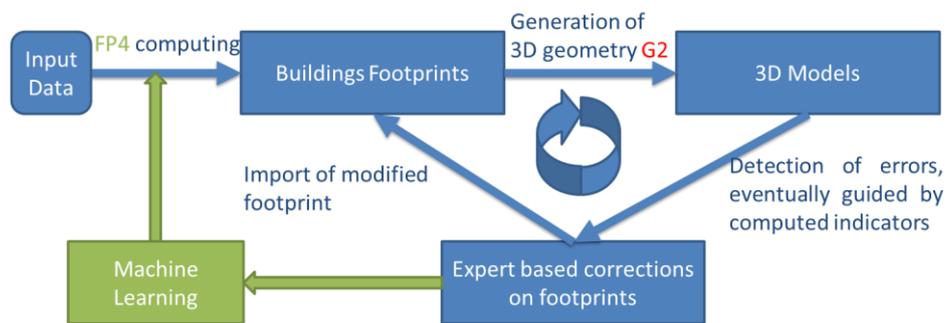


Figure 45: Perspective d'amélioration de la méthode à l'aide d'une étape de validation humaine pour gérer les cas particuliers.

3.1.2 Création d'un modèle 3D de végétation

La végétation est très souvent absente des modèles virtuels 3D de villes, alors qu'elle occupera une place de plus en plus importante dans le paysage urbain de la plupart des villes modernes qui redonnent de l'importance aux espaces verts à l'intérieur de leurs territoires, afin d'influer par exemple sur la température au sol. De plus, cela représente une composante importante d'un territoire urbain et nous en aurons donc besoin dans les chapitres suivants visant à analyser celui-ci.

Nous proposons une méthode permettant de générer un modèle 3D représentant la végétation sur un territoire donné, en combinant un nuage de points LiDAR ainsi qu'une orthophotographie infrarouge de la zone. Nous cherchons à produire un maillage triangulaire représentant la canopée végétale d'un territoire donné.

Les données LiDAR possèdent souvent une classification automatiquement générée (qui détermine à quel type d'objet correspond chaque point) et, dans le cas contraire, des outils sont librement disponibles pour générer facilement une telle classification, comme par exemple LAStools⁴³ [HKF04]. Cependant, ces classifications sont approximatives et le nuage de points ne peut pas être exploité en l'état afin de générer une modélisation 3D fiable de la végétation. La Figure 46 illustre ces imprécisions sur un LiDAR de la ville de Lyon qui a été colorié selon sa classification. La végétation y est représentée en vert, et nous pouvons constater qu'un grand nombre de points considérés comme représentant de la végétation semblent plutôt correspondre à des façades de bâtiments.

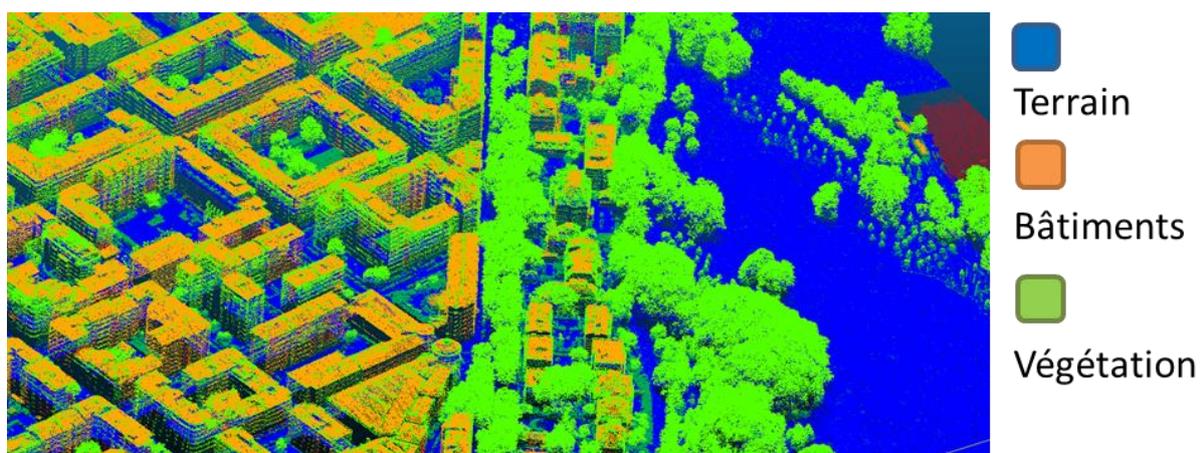


Figure 46: Données LiDAR classifiées : la végétation y est représentée en vert. (Données issues du site de la Métropole de Lyon⁴⁴)

⁴³ <https://rapidlasso.com/lastools/>

⁴⁴ <https://data.grandlyon.com/imagerie/points-lidar-2015-du-grand-lyon/>

Nous avons constaté que les méthodes de classification traditionnelles de nuages de points ont essentiellement des problèmes de faux-positifs correspondant à des points assignés à tort à la classe « végétation ». Il est plus rare d'avoir des problèmes de zones de végétation non détectées puisqu'elles ont des caractéristiques particulières faciles à identifier. Dans ces conditions, améliorer la classification revient donc à filtrer les points de végétation afin d'éliminer ceux correspondant à d'autres types d'objets urbains.

Parmi les couches librement disponibles, nous nous intéressons aux données orthophotographiques infrarouges qui permettent aussi de détecter les zones de végétation. En effet, les végétaux se caractérisent par des comportements particuliers dans les hautes fréquences et la signature spectrale de la végétation est donc un moyen fiable de la détecter à partir d'images infrarouges.

Nous allons donc exploiter ces orthophotographies infrarouges afin de filtrer la classe « végétation » d'un LiDAR et ensuite pouvoir générer la géométrie 3D correspondante. Cette géométrie 3D correspondra à une triangulation de la canopée végétale, c'est-à-dire que nous ne prendrons que les points de végétation situés aux sommets de ces zones végétales, que nous discrétiserons afin d'en générer un maillage triangulaire.

Afin de filtrer les points classés « végétation », nous commençons par exploiter les attributs déjà présents dans les données LiDAR, tels que la valeur de l'intensité du retour laser, ou le nombre de ces retours pour un faisceau donné. En effet, un faisceau laser peut traverser plusieurs objets, et donc générer plusieurs retours, avant d'atteindre une surface dure telle que le sol ou un bâtiment (Figure 47).

Cette information est utile car nous savons ainsi qu'un faisceau avec un seul retour a très peu de chance de correspondre à de la végétation, et nous pouvons donc retirer toutes ces occurrences de rayon à retour unique parmi la classe végétation initiale. De plus, nous cherchons actuellement à modéliser uniquement la canopée des zones végétales et nous ne conservons donc que le premier retour des faisceaux.

En plus de ces attributs concernant le nombre de retours, chaque point possède également une valeur d'intensité correspondant à la force de retour de l'impulsion laser l'ayant généré. Elle repose, en partie, sur la réflectivité de l'objet touché par l'impulsion laser. La réflectivité est relative à la longueur d'onde utilisée et la force des retours varie selon la composition de l'objet de surface qui reflète le retour. Cependant, l'intensité est relative et non quantifiable, ce qui signifie par conséquent que nous ne pouvons pas nous attendre à retrouver la même valeur provenant d'une cible donnée d'un vol à l'autre. Bien que cet attribut soit donc à utiliser avec

précaution, il permet tout de même d'éliminer des points qui ont une valeur ne pouvant correspondre à de la végétation.

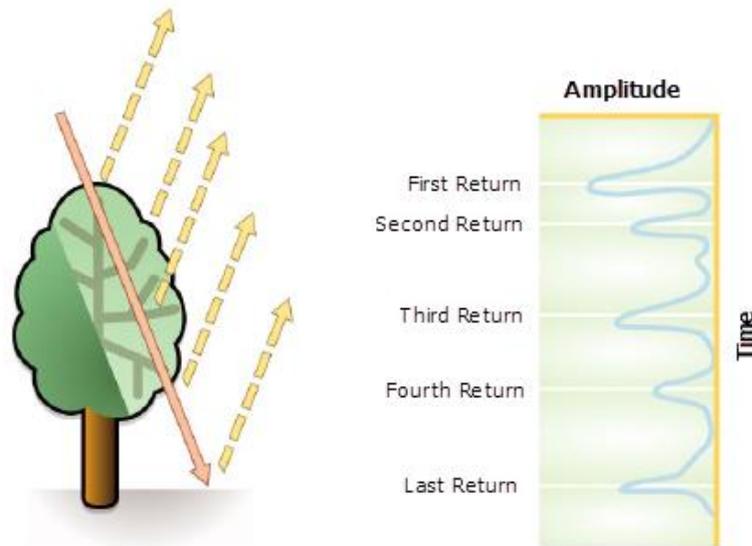


Figure 47: Un faisceau laser LiDAR peut correspondre à de multiples retours en fonction du type d'objet intersecté, et chaque retour possède une intensité différente en fonction du matériau intersecté. (Image extraite du site d'ArcGIS⁴⁵)

Grâce à ces différents filtres, nous réduisons le nombre de points classés comme représentant de la végétation de manière significative : sur une tuile de 1km par 1km du 6^{ème} arrondissement de la ville Lyon, nous passons ainsi de 6.6 millions de points végétation à 2.1 millions (Figure 48).

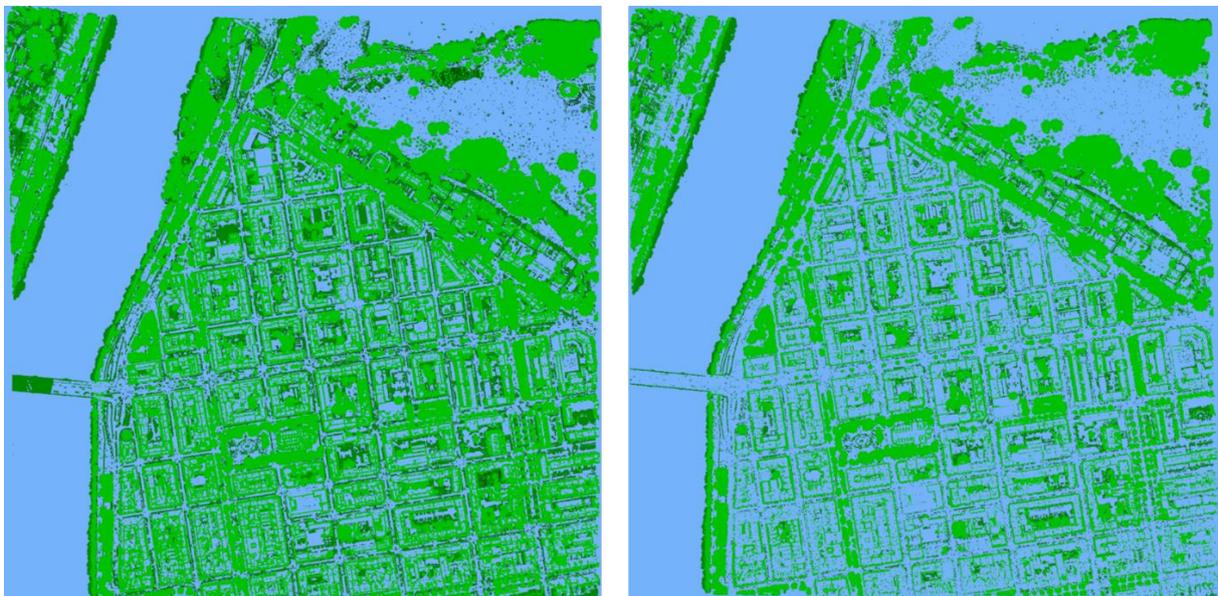


Figure 48: Points d'une tuile LiDAR de 1km x 1km classés « végétation ». Données originales à gauche (6.6M de points), données filtrées par les paramètres présents dans le LiDAR à droite (2.1M de points).

⁴⁵ <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>

Nous lions ensuite cette donnée aux orthophotographies infrarouges afin de poursuivre l'élimination des points ne correspondant pas à de la végétation. Il faut au préalable préparer l'image afin de pouvoir correctement l'exploiter. Le prétraitement mis en place consiste d'abord à appliquer un filtre Gaussien sur l'image afin d'éliminer les extrema locaux et « lisser » les canaux couleurs de l'image Figure 49. Cela permet notamment de diminuer l'influence du bruit présent suite à l'acquisition aérienne des orthophotographies.

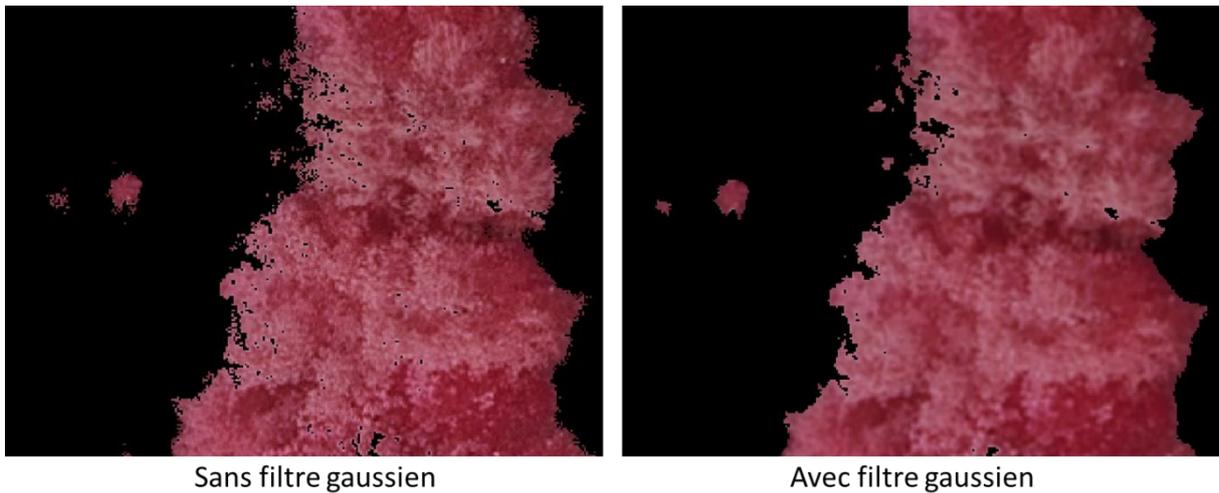


Figure 49: Application d'un filtre Gaussien sur une orthophotographie infrarouge.

Nous appliquons ensuite un filtre sur le canal rouge afin de ne conserver que les pixels correspondant à de la végétation (Figure 50).



Figure 50: Orthophotographie infrarouge filtrée afin de ne conserver que les points dont la valeur du canal infrarouge semble correspondre à de la végétation.

Nous mettons ensuite en relation cette image avec les données LiDAR préfiltrées afin de filtrer les points du LiDAR qui ne correspondent pas à une zone végétale dans l'image filtrée.

Cela se fait facilement si les deux données sont définies dans le même système de référence spatial. Pour chaque point 3D du LiDAR, nous cherchons dans les 9 pixels voisins (pixel le plus proche + voisinage V8) de l'image infrarouge si au moins l'un d'entre eux correspond à de la végétation.

La dernière étape de filtrage consiste alors à segmenter ce nuage afin d'éliminer les points « isolés » correspondant très souvent à de fausses détections. Pour cela, nous regroupons les points proches les uns des autres (moins de 2m de distance dans notre exemple) et nous éliminons les groupes constitués par peu de points (moins de 50 points dans notre exemple, et nous rappelons que le LiDAR utilisé propose une densité d'environ 12 points/m²). Ce partitionnement du nuage de point initial en groupements de points proches est réalisé à l'aide de la méthode d'Euclidean Cluster Extraction présente dans la librairie Point Cloud Library (PCL⁴⁶). L'utilisation de cette méthode est illustrée sur le site de PCL⁴⁷ ; elle est basée sur les travaux de [Rus10] et fait notamment intervenir une structure Kd-tree afin de détecter rapidement les plus proches voisins. Le résultat obtenu est illustré Figure 51.



Figure 51: Résultat final du nuage de points filtrés pour ne conserver que les points correspondant à de la végétation (1.4M de points).

La Figure 52 propose une autre visualisation des résultats en comparant les données initiales (à gauche) et le nuage de point filtré en sortie (à droite, en bleu).

⁴⁶ <http://pointclouds.org/>

⁴⁷ http://pointclouds.org/documentation/tutorials/cluster_extraction.php#cluster-extraction

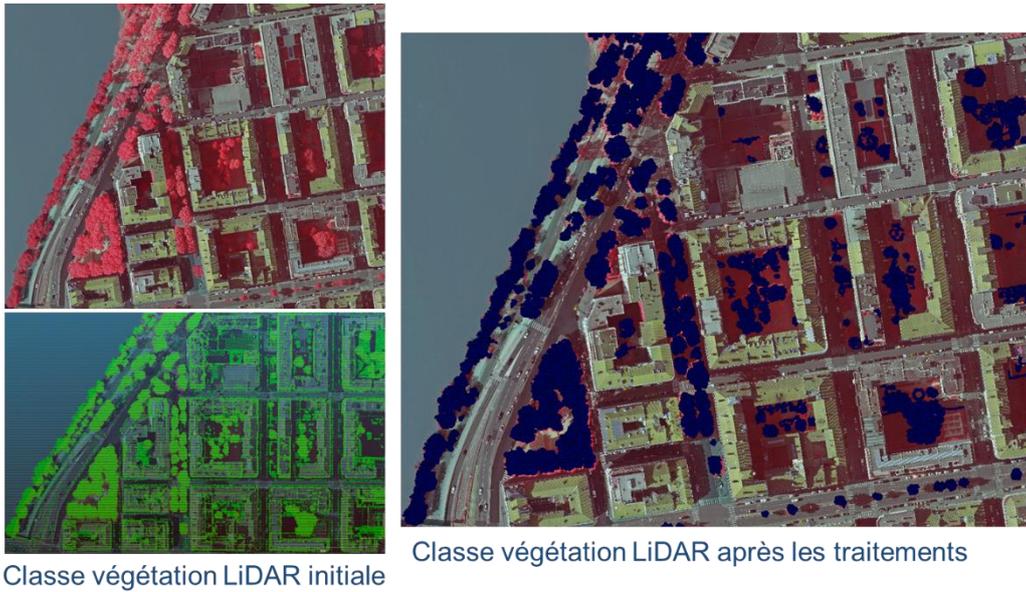


Figure 52: A gauche : orthophotographies infrarouge et points initiaux du LiDAR classés comme de la végétation. A droite: le résultat des différentes étapes de filtrage avec le nuage de points résultat en bleu.

Une recherche manuelle de la végétation a été effectuée sur cette même zone depuis l'orthophotographie RVB et est présentée dans la Figure 53. Les résultats sont globalement équivalents, la méthode automatique permet cependant de détecter plus facilement des petites zones de végétation à l'ombre dans des cours intérieures puisque le canal infrarouge n'est normalement pas impacté par cette ombre.

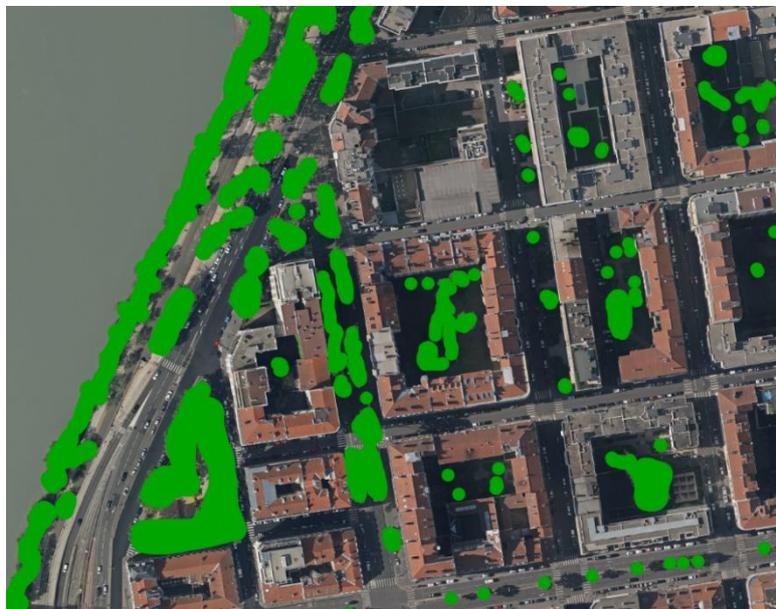


Figure 53: Détection manuelle des zones de végétation grâce à l'orthophotographie RVB.

Nous avons maintenant un nuage de points 3D que l'on considère comme représentant les zones de végétation. Il existe plusieurs manières d'exploiter ces données : nous pouvons nous en servir pour générer un maillage 3D correspondant à la canopée végétale, générer des arbres de manière procédurale ou en utilisant des modèles prédéfinis afin de recouvrir la zone, mais

également pour mettre à jour des bases de données 2D répertoriant les positions des arbres sur le territoire urbain.

Puisque nous souhaitons ici proposer une modélisation 3D de la canopée végétale, nous devons pour cela discrétiser les zones de végétation afin d'en proposer un maillage. Pour cela, nous discrétisons l'espace 2D en le plongeant dans une grille de dimension paramétrable. Pour chaque cellule de cet espace, nous détectons les points situés à l'intérieur et nous en calculons la valeur de hauteur moyenne afin de conserver l'information 3D. Nous lions ensuite les tuiles voisines entre elles afin de générer un maillage triangulaire 3D (Figure 54) grâce à la méthode bien connue de Vertex Clustering [LT97].

Cette méthode fournit ainsi une modélisation 3D de la canopée végétale, plus ou moins grossière en fonction de la dimension de tuile choisie. La Figure 55 illustre à droite la géométrie 3D générée sur une tuile de 1km par 1km avec une précision de grille de 2m, en comparaison à gauche avec une capture prise de la zone depuis Google Earth.

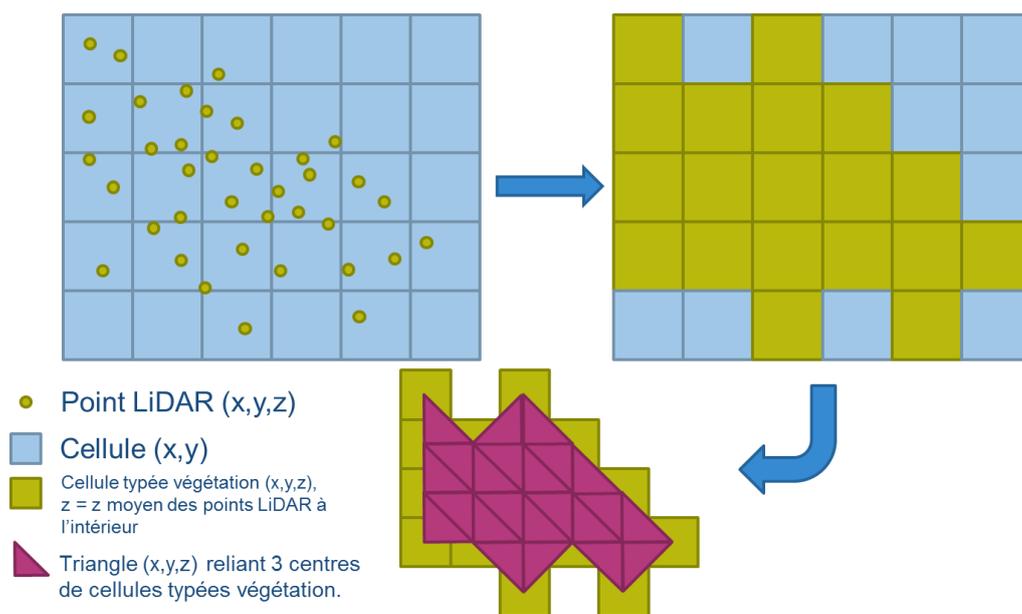


Figure 54: Génération d'un maillage triangulaire 3D de la végétation à partir d'un nuage de points que l'on discrétise dans une grille de dimension réglable.



Figure 55: Résultat de la génération d'un modèle 3D de végétation (à droite) sur la colline de Fourvière à Lyon. Comparaison avec la modélisation proposée dans Google Earth à gauche.

Cette modélisation 3D a été exportée selon le standard CityGML qui permet de définir des objets végétaux comme le montre la Figure 56.

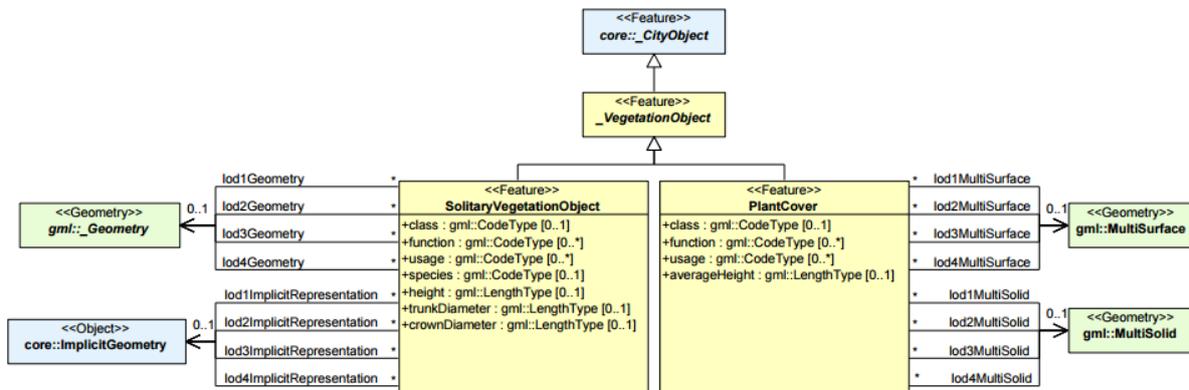


Figure 56: Diagramme UML des objets végétation défini dans le standard CityGML [GP12]).

Les petites zones de végétation correspondant à des arbres isolés ont été enregistrées en tant que « SolitaryVegetationObject » alors que les zones plus étendues sont définies en sortie comme des « PlantCover ». Le Tableau 2 donne quelques temps de calcul sur 4 tuiles différentes. Ceux-ci varient beaucoup d'une tuile à l'autre (surtout pour l'étape de génération de la géométrie 3D) car ils dépendent directement de la densité de végétation concernée.

Tableau 2: Temps de calcul de génération de la végétation 3D sur 4 tuiles distinctes.

Etape	Traitement	Numéro de tuile (1000m x 1000m)			
		1843_5176	1843_5177	1844_5176	1844_5177
1	Filtrage points	1,2s	1,5s	1,3s	1,2s
2	Filtrage Gaussien IRC	29,5s	33,4s	36,1s	37,3s
3	Filtrage canal rouge IRC	6,2s	6,5s	6,5s	6,8s
4	Filtrage LiDAR par IRC	1s	1,4s	1,1s	1,1s
5	Export 3D (précision de 2m)	27,7s	370s	44,4s	146s
Total		65,7s	413s	89,3s	193s

3.1.3 Synthèse

Nous avons proposé deux méthodes distinctes faisant intervenir des jeux de données hétérogènes afin de proposer en sortie un modèle 3D de la ville plus précis. La première définit une notion d'objets bâtiments plus précise que celle habituellement présente dans les modèles 3D, grâce aux informations apportées par des jeux de données tels que le cadastre qui permettent de répertorier les bâtiments d'un territoire ainsi qu'un certain nombre d'informations les décrivant. De nouvelles possibilités pour les analyses du modèle 3D sont ainsi offertes grâce à l'accès aux informations sémantiques des objets composants la ville. Cela peut s'avérer utile aussi bien pour des outils de manipulation de modèles 3D qui ne proposent plus qu'une simple visualisation (par exemple, en cliquant sur un bâtiment modélisé en 3D l'utilisateur peut dorénavant accéder à ses informations), que pour des analyses comme celles que nous proposons dans la section 4.2 visant à mesurer l'ambiance du territoire. Savoir qu'un objet est visible depuis un point ou génère de l'ombre est utile, mais la possibilité de connaître sa fonction, sa date de construction ou son propriétaire ouvre de nouvelles perspectives d'interprétation de ces analyses très demandées par les géographes et urbanistes partenaires.

Cette méthode est cependant limitée aux modèles de bâtiments équivalents au LoD 2 du standard CityGML et nécessiterait d'être adaptée aux modèles LoD 3 et supérieurs. La difficulté réside cependant dans le fait qu'il ne sera plus possible d'utiliser l'emprise au sol puisque celle-ci ne sera plus caractéristique du modèle globale d'un bâtiment qui pourra contenir de nombreux détails situés en dehors de celle-ci.

Les résultats produits actuellement comportent encore un certain nombre d'incohérences qui seront compliquées à corriger à l'aide d'une méthode entièrement automatique, puisque chaque ville apportera ses propres cas particuliers. En ce sens, il nous semble nécessaire de proposer une méthode semi-automatique qui permettra aux experts de produire des résultats pertinents tout en évitant plusieurs semaines de manipulations manuelles.

La méthode restera néanmoins dépendante des données utilisées et les résultats seront plus pertinents si le modèle 3D et les données 2D telles que le cadastre convergent afin de proposer des représentations plus proches de la réalité. Chaque jeu de données pourrait très probablement permettre l'amélioration de l'autre pour les futures campagnes d'acquisitions ou de mises à jour. Cela met en relief l'intérêt de proposer aujourd'hui des méthodes s'appuyant sur des croisements de données (crowd-sourcing).

La seconde méthode utilise un nuage de points LiDAR et des orthophotographies infrarouges afin de générer des modèles 3D de végétation qui viendront compléter les modèles urbains qui en sont généralement dépourvus. Par exemple, une couche de végétation 3D créée par notre méthode est actuellement exploitée par la Métropole de Lyon pour enrichir ses modèles virtuels. Elle permet dans le cadre d'une modélisation des sous-sols de prédire l'impact que peut avoir le système racinaire lié à ces arbres sur les infrastructures. La présence de cette végétation dans le modèle 3D permet également des analyses plus pertinentes du territoire, comme nous le verrons par la suite dans la section 4.2. La végétation est un élément très présent en ville, et son absence paraissait donc préjudiciable pour toute tentative d'analyse du territoire.

Nous nous sommes cependant limités à modéliser la canopée en générant un maillage triangulaire simple, une discussion pourra être menée afin de définir la géométrie à donner à la végétation située en dessous : doit-on définir des arbres isolés et si oui, comment ?

De plus, les méthodes de filtrage sur les images infrarouges et de classification du nuage de points LiDAR utilisées restent simples vis-à-vis de la veille récente que nous avons effectuée.

Nous venons de présenter deux méthodes dont le but est d'enrichir le modèle virtuel 3D de la ville. Les données ainsi produites seront exploitées dans les traitements que nous présenterons par la suite. Cela aura cependant pour conséquence d'alourdir encore plus leur manipulation. C'est pourquoi il nous semble indispensable de proposer des structures organisant les données d'un modèle 3D afin de rendre ainsi plus aisé les traitements.

3.2 Structure de données pour représenter la ville 3D

Les modèles 3D peuvent recouvrir des territoires s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres carrés et sont composés de divers objets (bâtiments, routes, végétation, etc.) définis géométriquement et sémantiquement. Il est actuellement impossible de pouvoir gérer un tel modèle dans sa globalité sans une structure de données permettant de le parcourir efficacement.

A titre d'exemple, les données disponibles en libre accès pour la Métropole de Lyon représentent plus de 550km² de territoire. Celui-ci est découpé en tuiles de 1km x 1km dont un exemple est illustré dans la Figure 57. Cette tuile est issue du centre de Lyon (donc relativement dense), et le nombre de triangles par type d'objet est donné dans le Tableau 3, qui montre notamment qu'elle est composée de plus de 200.000 triangles répartis en 4 types d'objets différents.



Figure 57: Une tuile de 1km par 1km issue des données de la ville de Lyon. Elle est composée de 4 types d'objets : bâtiments, terrain, routes et végétation.

Bien que ce soit une problématique très courante en informatique graphique dont les applications doivent parfois pouvoir gérer des scènes complexes composées parfois de millions de triangles, le contexte géographique amène un ensemble de contraintes liées à la sémantique des objets présents dans ces scènes qui nécessitent un traitement particulier. En effet, en fonction des applications la géométrie seule ne suffira pas forcément à mettre en place une structure organisatrice efficace des données d'un modèle virtuel de la ville. Par

exemple, un triangle de mur aura plus intérêt à se lier aux autres triangles du même bâtiment plutôt qu’au terrain qui est peut-être plus proche, puisque ces triangles de murs sont définis dans le même objet « bâtiment » et que le parcours du modèle virtuel en sera ainsi facilité.

Tableau 3: Nombre de triangles pour chaque type d’objet urbain sur la tuile représentée dans la Figure 57.

Type of object	Number of triangles
Building	118948
Terrain	26785
Road	17800
Vegetation	73142
Total	236675

Nous proposons dans ce chapitre de mettre en place différentes structures organisant les données de la ville, permettant de prendre en compte à différents niveaux la géométrie 3D, mais aussi la sémantique de ce modèle en fonction des besoins des applications.

Les modèles 3D de la ville sont initialement découpés en fichiers distincts de manière imprévisible (les choix de découpe peuvent être différents en fonction du jeu de données car il n’existe aucune règle). Cette découpe peut ainsi impliquer des conditions purement géométriques, peut prendre en compte une notion de « quartiers » de la ville (1 fichier par quartier, par commune, etc.), ou peut simplement être dictée par la méthode d’acquisition employée. Quoi qu’il en soit, cela signifie que cette découpe n’est pas qualifiable et qu’il faut donc être capable de traiter un modèle de ville dans sa globalité et non simplement fichier par fichier afin de donner la possibilité de réorganiser les données en fonction de l’application.

De plus, cette structuration doit pouvoir être exportée et stockée afin de ne pas avoir à la recalculer.

Un exemple de répartition initiale en fichiers distincts d’un territoire simple est illustré à gauche de la Figure 58. Comme le montre le schéma à droite, chacun des trois fichiers est constitué d’un ensemble d’éléments hiérarchisés selon la définition sémantique et topologique du modèle urbain (exemple : un mur est composé de murs et de toits, etc.).

Nous allons ici présenter trois structures qui permettent de réorganiser les éléments du territoire selon des critères différents. La première organisation est un tuilage selon une grille régulière qui ne prend en compte que des critères géométriques. La seconde utilise la structure sémantique et topologique présente dans le modèle virtuel pour partitionner la scène selon une hiérarchie de boîtes englobantes. La dernière organisation proposera un partitionnement

géométrique du territoire urbain, mais la forme de ces géométries dépendra d'informations sémantiques représentant les éléments structurants de la ville grâce au réseau routier.

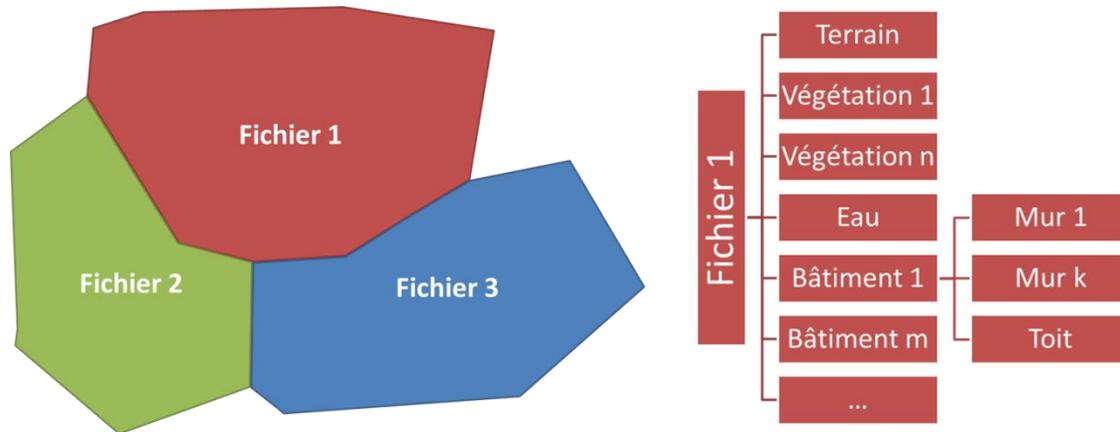


Figure 58: Un territoire simple initialement découpé en trois fichiers distincts (à gauche). Chaque fichier est ensuite constitué d'un ensemble d'éléments hiérarchisés.

3.2.1 Tuilage en grille régulière

La première organisation des données proposée consiste à découper le territoire du modèle selon une grille régulière dont la dimension et la forme des cellules est paramétrable. Un exemple de tuilage selon une grille carrée est présenté Figure 59. Nous allons considérer pour la suite uniquement des tuiles carrées mais il serait également possible de mettre en place un tuilage avec des cellules rectangulaires ou hexagonales par exemple. Ce processus de tuilage doit pouvoir prendre en compte les différents types d'objets de la ville (terrains, bâtiments, etc.). Il traite tous les fichiers composant un modèle virtuel 3D de ville et génère en sortie un ensemble de tuiles indépendantes.

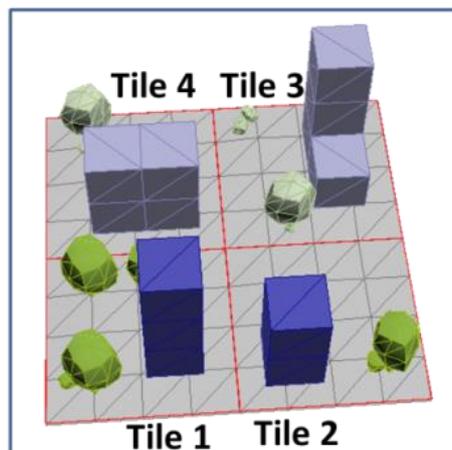


Figure 59: Organisation d'un modèle de ville selon une grille régulière.

Si ce traitement se fait de manière immédiate pour la majorité des éléments de la ville, le principal problème réside dans le traitement des objets se trouvant à cheval sur plusieurs tuiles

pour lesquels une décision doit être prise. Nous identifions pour cela deux solutions. La première consiste à découper ces objets selon les emprises des tuiles, et à assigner chaque partie découpée à la tuile correspondante. La seconde solution conserve les objets frontaliers inchangés en les assignant à une seule des tuiles concernées : nous choisissons d'assigner chaque objet à la tuile contenant son centre de gravité.

La première solution a pour avantage de proposer une découpe régulière du territoire et les emprises de tuiles ainsi créées partitionnent le territoire de manière prévisible. Par exemple, cela permet de faciliter le parcours du modèle urbain pour certaines applications, comme celles basées sur des lancers de rayon. En effet, dans le cadre d'une propagation rectiligne d'un rayon dans le territoire représenté par le modèle 3D, il est utile de pouvoir parcourir les tuiles dans l'ordre dans lequel le rayon les traverse, afin de détecter rapidement d'éventuelles intersections avec les objets les plus proches possibles de l'origine de ce rayon. En fonction de cette origine du rayon, le tuilage par découpe des objets frontaliers permet d'établir facilement l'ordre de parcours des tuiles, contrairement au tuilage par assignation de ces objets.

Le tuilage par assignation produit en effet des tuiles avec des contours non réguliers, car modelés par les emprises des objets frontaliers, et il est alors impossible de définir un ordre de parcours prédéfini. La Figure 60 illustre un rayon se propageant dans un territoire tuilé par découpe (à gauche) et par assignation (à droite).

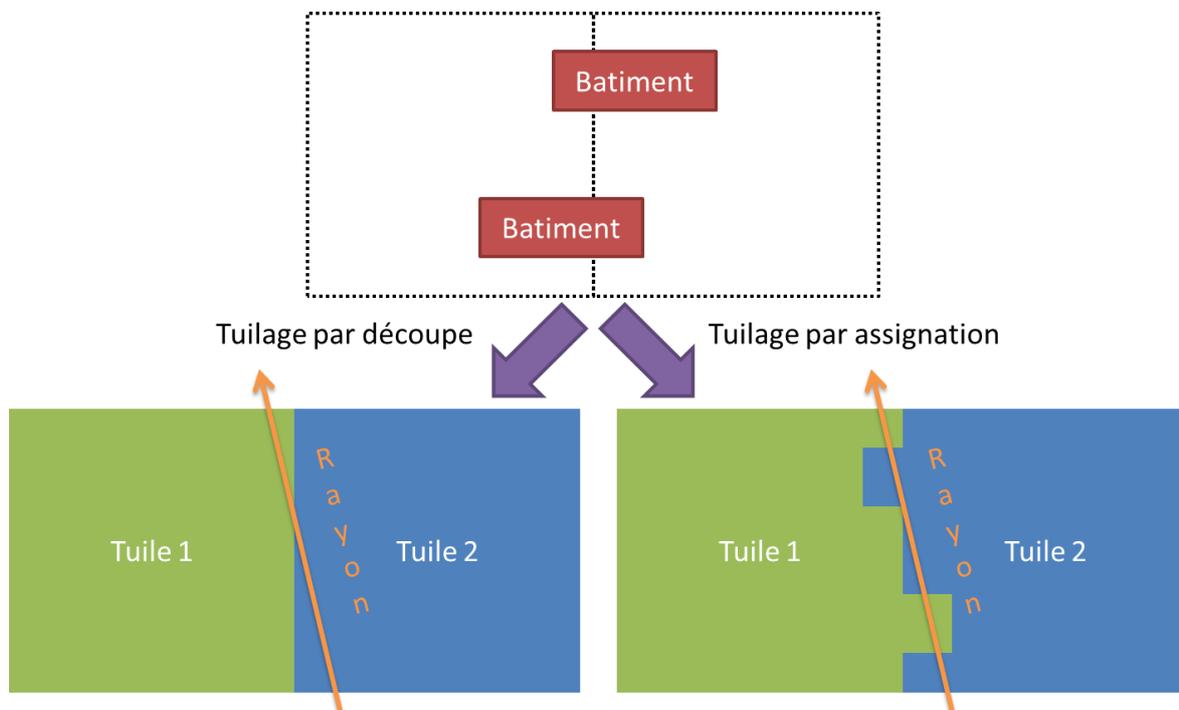


Figure 60: Le tuilage par assignation produit des frontières cisailées complexifiant leur utilisation dans le cas d'un lancer de rayon par exemple.

Dans le cas du tuilage par découpe, il est possible de déterminer que la Tuile 2 doit être chargée en premier puisque la trajectoire du rayon passe d'abord par son territoire avant de rentrer dans celui de l'autre tuile. Le rayon ne passera dans la Tuile 1 que s'il n'intersecte aucun objet de la Tuile 2, ce qui signifie qu'il ne sera peut-être pas nécessaire de la charger. Mais dans le tuilage par assignation, il est nécessaire de charger les deux tuiles dès le début puisqu'il n'est pas possible de prévoir si le rayon va d'abord intersecter un objet de l'une ou l'autre tuile.

Cependant, le tuilage par assignation évite la duplication des objets coupés en deux qui nécessite une gestion particulière lors du parcours du modèle. Puisqu'initialement chaque objet est sémantiquement défini comme un élément unique ayant son identifiant et ses éventuelles informations sémantiques, le partager en deux revient alors à le définir deux fois dans le modèle 3D global. Il faut donc que le parcours du modèle considère qu'un même objet puisse se retrouver dans différentes tuiles et que ces différentes parties forment un tout.

En fonction de l'application désirée, il faudra donc choisir entre la simplicité de manipulation du tuilage par assignation et la flexibilité de parcours du tuilage par découpe des objets frontaliers.

Un second problème concerne la gestion des fichiers distincts du modèle initial possédant des tuiles communes, tel qu'illustré dans la Figure 61. Le territoire d'une tuile ne correspond pas nécessairement à un unique fichier en entrée, et il est donc nécessaire de pouvoir regrouper les informations provenant de ces multiples fichiers en une seule tuile.

Puisque nous ne pouvons pas traiter tous les fichiers simultanément et que nous n'avons pas d'information préalable concernant les voisinages entre les différents fichiers, la création de tuiles prend donc en compte les objets de la ville qui ont déjà été générés sur le territoire de cette tuile afin de générer en sortie une unique tuile comprenant tous les éléments provenant des différents fichiers en entrée.

Une fois tous les fichiers du modèle initial traités partitionnés en un ensemble de tuiles en sortie, nous générons en plus une liste référençant toutes les tuiles existantes et renseignant la boîte englobante pour chacune d'entre elle. La boîte englobante d'un objet est la boîte de volume minimal permettant de contenir entièrement la géométrie de cet objet. Dans notre cas, et ce sera toujours le cas dans ce manuscrit, nous utilisons des boîtes englobantes alignées sur les axes principaux (Axis Aligned Bounding Boxes : AABB) du système de coordonnées utilisé : cela signifie que les faces de cette boîte sont soit horizontales, soit verticales. Il existe

d'autres types de boîtes englobantes mais nous avons choisi les AABB pour leur facilité de création et de manipulation. Cette liste de boîtes englobantes doit être exportée afin de stocker les informations des tuiles et faciliter l'utilisation de cette structure lors de traitements ultérieurs.

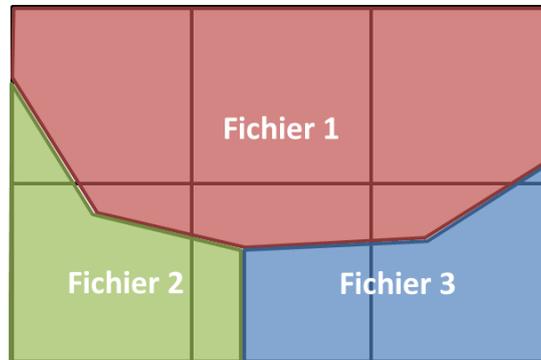


Figure 61: Des fichiers distincts du modèle urbain peuvent partager des tuiles en commun.

La régularité de la grille créée facilite également la mise en place de structures accélératrices basiques telles que le quadtree qui partitionne le territoire étudié en le subdivisant récursivement quatre par quatre (Figure 64).



Figure 62: Subdivision récursive d'un territoire quatre par quatre pour la mise en place d'un quadtree.

Dans notre cas, nous faisons le chemin inverse en partant des boîtes englobantes des tuiles précédemment générées que nous regroupons quatre par quatre afin de former des nœuds du quadtree correspondant à des boîtes englobantes de plus en plus grosses (Figure 63). Cela nous permet d'obtenir la structure arborescente proposée dans la Figure 64.

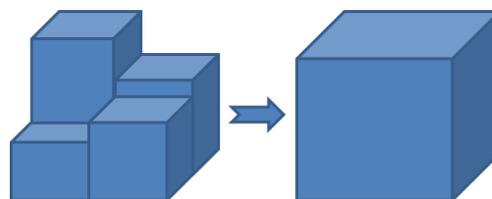


Figure 63: Agrégation quatre par quatre des boîtes englobantes des tuiles.

Ainsi, plutôt que de tester les boîtes englobantes de toutes les tuiles d'un territoire, nous pouvons parcourir plus rapidement celui-ci en faisant des tests sur des boîtes englobantes de manière récursive. En partant du plus haut niveau, nous testons les 4 boîtes enfant d'un nœud donné uniquement si la boîte englobante de ce nœud-là vérifie la condition nécessaire au traitement. Cela permet de limiter les calculs à effectuer en éliminant plus rapidement les

zones non concernées sans avoir à charger en mémoire et traiter toutes les tuiles qui s’y trouvent.

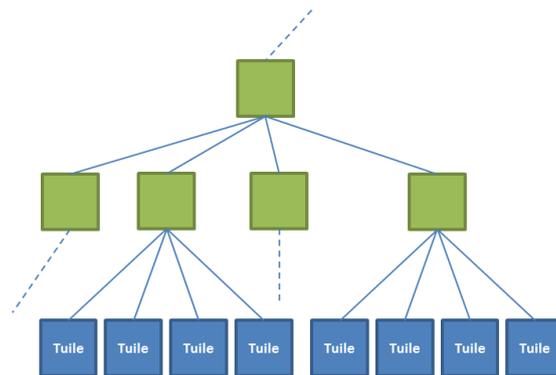


Figure 64: Structure arborescente en quadtree pour partitionner le territoire en boîtes englobante récursives. Le niveau le plus bas (les feuilles de l’arbre) correspond aux tuiles calculées. Tous les nœuds correspondent uniquement à des boîtes englobantes partitionnées en 4 sous boîtes, jusqu’à parvenir aux feuilles.

3.2.2 Semantic Bounding Volume Hierarchy

Si le tuilage permet une gestion efficace du modèle virtuel en générant un ensemble de tuiles représentées par leurs boîtes englobantes, il est également possible d’améliorer le parcours de ces tuiles en mettant en place une structure complémentaire visant à organiser les objets de la ville qui composent chaque tuile.

Dans la même logique que la structure quadtree organisant les boîtes englobantes des tuiles, il est possible de construire une hiérarchie de boîtes englobantes, ou Bounding Volume Hierarchy (BVH), pour les différents niveaux d’objets définis dans un modèle virtuel de ville.

De manière générale, une hiérarchie de boîte englobante est une arborescence permettant de gérer un ensemble d’objets géométriques. Chacun de ces objets est contenu dans une boîte englobante et représente une feuille de l’arbre (le niveau le plus bas). Ces feuilles sont regroupées en fonction de leurs proximités dans des nœuds. Ces nœuds sont à leur tour regroupés dans des nœuds plus grands, et ceci est répété récursivement jusqu’à éventuellement obtenir un unique nœud dont la boîte englobe la scène entière. Chaque nœud possède une boîte englobante qui contient l’ensemble des éléments se trouvant en dessous de lui. Cette structure est souvent utilisée dans des applications nécessitant des détections de collision ainsi que des lancers de rayons, afin d’éliminer rapidement tous les objets qui ne sont pas concernés sans avoir besoin de les tester un par un.

La structure quadtree précédemment présentée est une BVH du modèle 3D de la ville dont les feuilles correspondent aux tuiles, mais nous souhaitons ici compléter cette organisation en prenant en compte les objets de ces tuiles et les différents éléments qui les composent.

Pour une même scène, il est possible de générer plusieurs hiérarchies distinctes en fonction des regroupements effectués. Par exemple, une méthode répandue de construction de BVH consiste à partitionner récursivement la scène 3D étudiée grâce à une fonction de coût « surface area heuristic » permettant de déterminer les meilleures séparations à effectuer [Wal07]. Cette heuristique favorise les séparations permettant d'avoir une faible probabilité d'intersection d'un fils sachant que son père est lui-même intersecté, et ainsi minimiser le nombre d'intersections calculées. Il existe de nombreux autres travaux présentant des méthodes de création de telles structures accélératrices. Nous pouvons notamment citer ceux de [GLM96] et [KHM+98] qui proposent des Bounding Volume Hierarchies dans le but de faciliter la détection d'intersections entre différents objets d'une scène 3D.

A notre connaissance, les méthodes existantes se basent principalement sur des paramètres géométriques afin de partitionner hiérarchiquement les scènes 3D. Puisqu'un modèle de la ville est également riche en termes de sémantique, il nous semble pertinent d'utiliser une partition prenant en compte la sémantique.

Puisque un modèle virtuel de la ville possède déjà une structure hiérarchique basée sur la sémantique de ses éléments, nous avons plutôt décidé d'exploiter celle-ci afin de mettre en place une BVH. Les objets de la ville peuvent être définis sémantiquement selon divers niveaux de sous-éléments. C'est notamment le cas du standard CityGML qui propose par exemple des objets distincts « toits » et « murs » pour ses bâtiments, qui peuvent eux même contenir des objets « fenêtres » et « portes ». Nous proposons donc de nous servir de la structure hiérarchie déjà présente dans un modèle urbain pour partitionner son territoire en une hiérarchie de boîtes englobantes. Bien que cette partition ne soit pas idéale en termes d'efficacité de partitionnement (selon, par exemple, l'heuristique de [Wal07]), elle a l'avantage d'être immédiate à générer et son parcours sera grandement facilité pour les applications qui nécessitent d'accéder aux informations sémantiques et topologiques du modèle urbain.

Nous utilisons donc cette structure inhérente au modèle virtuel de la ville pour proposer une nouvelle structure de données : une semantic Bounding Volume Hierarchy (sBVH). La sBVH représente donc une hiérarchie de boîtes englobantes basée sur la structure sémantique (et topologique) des objets du modèle. Chaque nœud correspond à un niveau sémantique du modèle virtuel : pour chaque objet sémantiquement défini dans celui-ci, une boîte englobant les géométries se trouvant en dessous de lui est calculée et stockée comme un nœud dans la

hiérarchie. Les feuilles correspondent alors au niveau le plus bas des objets dans le modèle urbain, ce sont les éléments qui possèdent une géométrie 3D. Un exemple de sBVH est illustré dans la Figure 65.

Une sBVH permet d'éviter l'implication inutile de géométries 3D non concernées lors de traitements en orientant le parcours du modèle 3D vers les objets dont la boîte englobante semble impactée par le traitement en cours. Ainsi, chaque géométrie 3D n'est testée que si la boîte englobante de la feuille correspondante a vérifié la condition signifiant que l'objet peut être concerné par le traitement. Cependant, certains éléments comme le terrain sont rarement décomposés en sous éléments et l'efficacité de cette structure sera donc limitée sur ceux-ci. Néanmoins, puisqu'ils ne correspondent pas aux objets les plus lourds (en termes de géométrie et de sémantique), le système de tuiles complémentaire suffira à permettre leur parcours, comme illustré dans la Figure 65 avec les niveaux supérieurs correspondant à ces tuiles.

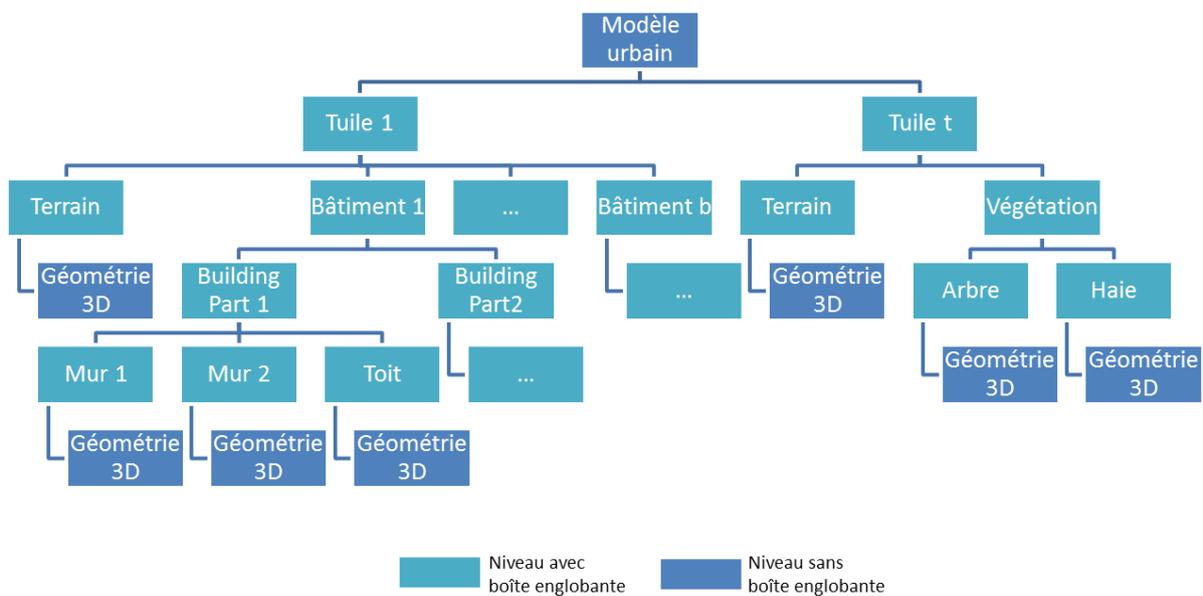


Figure 65: Semantic Bounding Volume Hierarchy d'un modèle de ville composé de multiples tuiles, elles-mêmes composées de différents niveaux d'objets urbains sémantiquement définis. Une boîte englobante est calculée pour chacun d'entre eux.

3.2.3 Hiérarchie d'îlots urbains

Nous avons également proposé une organisation plus flexible du modèle urbain en se basant sur une partition hiérarchisée du territoire d'une ville qui repose sur les éléments structurant naturellement ce territoire. Cette notion d'éléments structurants concerne tous les éléments de

la ville qui semblent avoir une influence importante sur la structure visuelle de la ville depuis le ciel : les grands boulevards, les cours d'eau, les voies de chemin de fer, etc.

En prenant l'ensemble de ces éléments, il est possible de créer des îlots polygonaux englobants tous les autres objets de la ville qui, isolément, n'ont pas un impact visuel fort. Par exemple, un bâtiment isolé n'a pas vraiment d'impact visuel depuis le ciel, contrairement au pâté de bâtiments dont il fait partie qui peut commencer à ressortir visuellement en fonction de sa taille. Or, le meilleur moyen de représenter cet ensemble de bâtiments consiste à prendre les routes qui l'encadrent et forment naturellement cet îlot urbain composé de bâtiments. Ce sont donc ici les routes qui constituent l'élément structurant puisqu'elles définissent la forme de l'îlot.

Selon l'échelle à laquelle nous nous situons, ces éléments structurants évoluent et de nouveaux apparaissent en se rapprochant du sol (par exemple, si les rues à quatre voies seront probablement visibles de loin, les rues à deux voies prendront de l'importance avec une altitude moindre). Nous souhaitons ainsi mettre en place une hiérarchie d'îlots urbains en définissant plusieurs niveaux d'éléments structurants qui permettent de générer des niveaux imbriqués d'îlots urbains.

Nous décidons pour cela d'impliquer à titre d'exemple quatre types de données différentes qui nous semblent structurer le territoire urbain : le réseau routier, le réseau ferré et les cours d'eau, ainsi que les parcs que nous considérons directement comme des îlots.

Le réseau routier est la couche de données la plus importante (en ville) et probablement la seule indispensable. En effet, la génération de ces îlots urbains nécessite d'avoir des cycles fermés (afin de générer des polygones) et seules les routes sont suffisamment nombreuses pour pouvoir créer une hiérarchie de partitionnement du territoire suffisamment intéressante. Par exemple, un cours d'eau pourra difficilement faire plus que de séparer en deux un territoire. Cette problématique de création de cycles fermés est notamment abordée dans le domaine des graphes avec les « Minimal Cycle Basis », comme par exemple dans les travaux de [Ebe05].

Le réseau routier couvre tout le territoire en le partitionnant en un ensemble de polygones imbriqués, dont il est relativement aisé d'extraire une hiérarchie. En effet, les routes peuvent être classées en différentes catégories selon leurs importances définies par exemple par leurs statuts (route nationale, départementale, etc.), leurs trafics ou encore leurs largeurs. Cela signifie qu'il est possible de générer de multiples niveaux d'îlots routiers en mettant en place

différents filtres sur les critères définis ci-dessus. La Figure 66 illustre ce principe pour un réseau routier simple représenté à gauche.

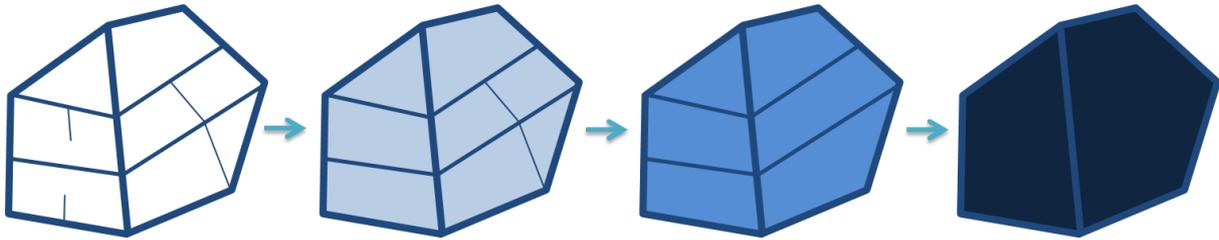


Figure 66: Un réseau routier est représenté à gauche, avec des routes d'importances différentes représentées par leurs largeurs. Des îlots sont générés selon les polygones définis par ces routes, et différents niveaux sont définis en retirant au fur et à mesure les routes de moindre importance.

Ce réseau simple est constitué de routes réparties selon 3 niveaux d'importance, représentés ici par leurs épaisseurs (plus la route est importante selon les critères choisis, plus le trait est épais). Ce réseau routier définit naturellement des îlots urbains fermés par ses routes (seconde image à partir de la gauche) qui peuvent être représentés par des polygones. Les impasses sont naturellement mises de côté puisqu'elles ne définissent pas d'îlot fermé. Grâce aux différentes importances de routes, il est possible de générer plusieurs niveaux de ces polygones en éliminant les routes d'une faible importance lors d'un passage au niveau supérieur. La troisième image correspond ainsi aux îlots définis par le réseau routier dans lequel les routes de faible importance ont été ignorées. Enfin, la dernière image correspond aux îlots définis uniquement par les routes de haute importance, toutes les autres ayant été retirées.

Ces trois niveaux d'îlots urbains constituent ainsi une hiérarchie structurant le territoire puisque chaque polygone d'un niveau donné est constitué d'un ensemble défini de polygones des niveaux inférieurs.

Cet exemple de hiérarchie ne fait intervenir que le réseau routier, mais la logique est la même avec l'ajout du réseau ferré et les cours d'eau qui viennent compléter le partitionnement et créer de nouveaux îlots. Quant aux parcs, nous considérons qu'ils représentent des éléments structurants importants de la ville et nous réunissons donc tous les îlots (créés par les autres données et correspondant souvent à des chemins piétonniers de faible importance) se trouvant à l'intérieur afin de former un unique îlot qui sera positionné en haut de la hiérarchie.

Bien que cette méthode de génération de hiérarchie soit applicable à n'importe quel jeu de données (les couches nécessaires sont disponibles dans la plupart des grandes villes), nous proposons ici d'utiliser les données définies dans OpenStreetMap (OSM) afin d'assurer une cohérence entre les villes, notamment pour les informations sémantiques que nous allons exploiter. En effet, l'utilisation d'OSM, qui couvre quasiment toute la planète en proposant

des données librement disponibles, assure une certaine homogénéité des données entre les différents territoires pouvant être traités. Cela évite ainsi d'avoir à se questionner sur la manière dont sont stockées ces données selon les villes étudiées.

Le premier jeu de données d'OSM est logiquement le réseau routier. Il est représenté par un ensemble de lignes possédant des informations sémantiques. Par exemple, le réseau routier extrait d'OSM sur le territoire de la ville de Lyon est représenté Figure 67.

Parmi les informations contenues dans chaque tronçon de route, celle qui nous intéresse concerne son type ; un certain nombre de types de routes différentes sont définies dans les données d'OSM. Elles sont définies par [Ram14] et sont listées dans le Tableau 4.



Figure 67: Réseau routier de la ville de Lyon récupéré depuis OpenStreetMap.

Les routes sont définies par tronçons linéaires indépendants les uns des autres, mais elles possèdent un attribut « name » qui permet de retrouver l'ensemble des tronçons formant une unique route. Comme le montre la Figure 66, la création des polygones représentant des îlots se fait uniquement pour les réseaux fermés de route. Cela signifie que les impasses ne seront pas prises en compte, mais également qu'il faut être vigilant lors du filtrage des routes de moyenne importance. En effet, il suffit qu'un grand boulevard, ou n'importe quelle route que l'on pourra qualifier d'importante (selon des critères dont nous donnons un exemple par la suite), soit composée d'un tronçon qualifié dans le jeu de données comme peu important pour qu'une étape de filtrage coupe ce boulevard en deux, et lui enlève ainsi toute influence lors de

la création des îlots, comme représenté dans la Figure 68. Cela peut s'avérer gênant puisque ce boulevard représentait potentiellement un important élément structurant de la ville, et son impact est entièrement retiré à cause d'un unique tronçon pouvant correspondre à seulement quelques mètres.

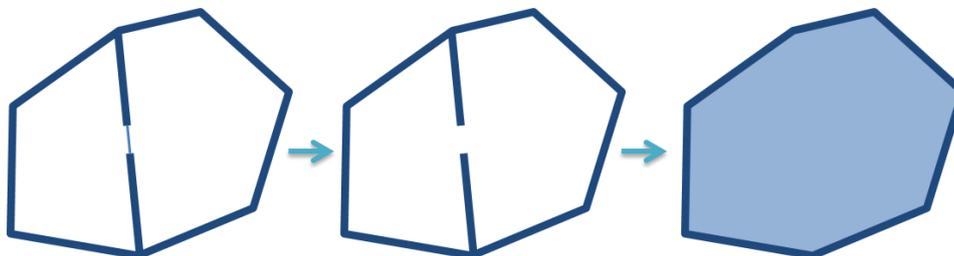


Figure 68: Si la notion d'importance de route est définie par tronçon, le filtrage peut générer des résultats inattendus.

Tableau 4: Différents types de routes définies dans OSM par [Ram14].

code	layer	fclass	Description	OSM Tags
511x	roads		Major roads	
5111	roads	motorway	Motorway/freeway	highway=motorway
5112	roads	trunk	Important roads, typically divided	highway=trunk
5113	roads	primary	Primary roads, typically national.	highway=primary
5114	roads	secondary	Secondary roads, typically regional.	highway=secondary
5115	roads	tertiary	Tertiary roads, typically local.	highway=tertiary
512x	roads		Minor Roads	
5121	roads	unclassified	Smaller local roads	highway=unclassified
5122	roads	residential	Roads in residential areas	highway=residential
5123	roads	living_street	Streets where pedestrians have priority over cars	highway=living_street
5124	roads	pedestrian	Pedestrian only streets	highway=pedestrian
513x	roads		Highway links (sliproads/ramps)	
5131	roads	motorway_link	Roads that connect from one road to another of the same or lower category.	highway=motorway_link
5132	roads	trunk_link		highway=trunk_link
5133	roads	primary_link		highway=primary_link
5134	roads	secondary_link		highway=secondary_link
514x	roads		Very small roads	
5141	roads	service	Service roads for access to buildings, parking lots, etc.	highway=service
5142	roads	track	For agricultural use, in forests, etc. Often gravel roads.	highway=track without tracktype specification
5143	roads	track_grade1	Tracks can be assigned a "tracktype" from 1 (asphalt or heavily compacted) to 5 (hardly visible). A detailed description is here: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Tracktype	... with tracktype=grade1
5144	roads	track_grade2		... with tracktype=grade2
5145	roads	track_grade3		... with tracktype=grade3
5146	roads	track_grade4		... with tracktype=grade4
5147	roads	track_grade5		... with tracktype=grade5
515x	roads		Paths unsuitable for cars	
5151	roads	bridleway	Paths for horse riding	highway=bridleway or highway=path with horse=designated
5152	roads	cycleway	Paths for cycling	highway=cycleway or highway=path with cycle=designated
5153	roads	footway	Footpaths	highway=footway or highway=path with foot=designated
5154	roads	path	Unspecified paths	highway=path without cycle/foot/horse=designated
5155	roads	steps	Flights of steps on footpaths	highway=steps
			Unknown	
5199	roads	unknown	Unknown type of road or path	highway=road

C'est pour éviter ce problème que nous choisissons de travailler au niveau des routes possédant un unique nom, plutôt que sur les tronçons. Un objet « route » signifie pour nous l'ensemble des tronçons continus possédant le même nom. Cela nécessite donc une étape les parcourant tous afin d'unir ceux possédant le même nom. Cette étape simple demande cependant de prendre en compte des cas particuliers. Il est notamment possible dans un unique modèle de trouver deux routes possédant le même nom mais étant distante l'une de l'autre. En effet, il est possible de trouver des noms de routes en commun dans différentes communes proches qui peuvent se trouver dans le même modèle urbain. Il faut donc unir uniquement les tronçons proches les uns des autres, en faisant attention de ne pas traiter ceux qui sont physiquement sécants puisque certaines routes sont représentées par des tronçons qui ne touchent pas, comme dans l'exemple de la Figure 69.

Afin de pouvoir travailler sur ces objets routes, il faut également définir leur importance qui permettra de déterminer leur présence ou non dans les différents niveaux de la hiérarchie. Nous choisissons d'appliquer à chaque route la plus haute importance disponible parmi ses tronçons. Ainsi, si elle est composée de tronçons primaires et d'autres secondaires, la route entière sera considérée comme « primaire ».

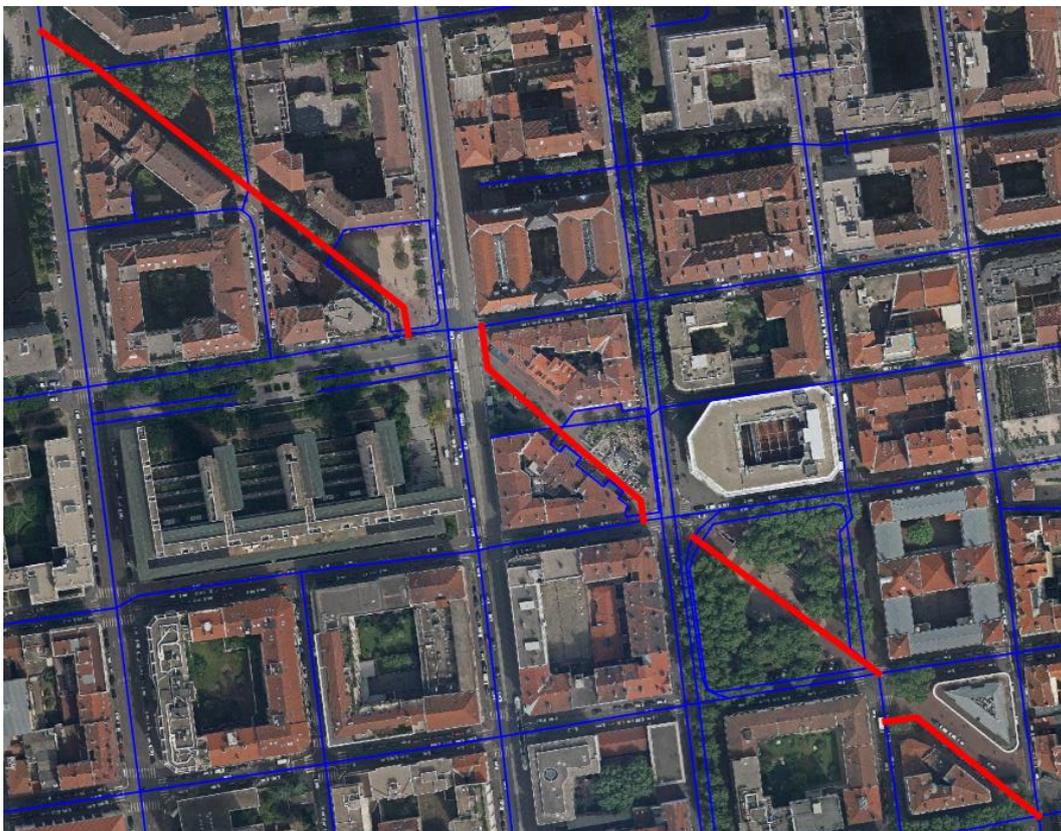


Figure 69: Une route peut être définie par des tronçons qui ne se touchent pas, comme celle en rouge.

La classification en termes d'importances est à réaliser en fonction du nombre de niveaux désiré et peut être modifiée en fonction des besoins. La Figure 70 présente la classification que nous avons mise en place afin de réaliser nos tests. Le niveau 1 correspond aux plus gros îlots alors que le niveau 4 correspond aux plus petits îlots possibles qui sont définis par toutes les routes disponibles.

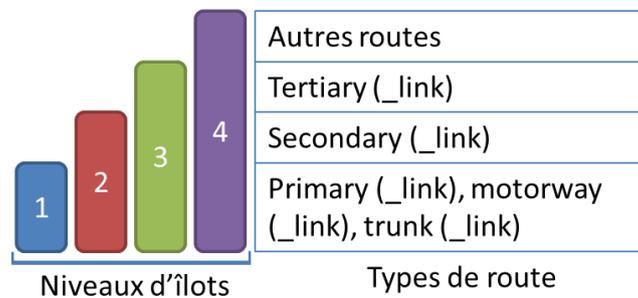


Figure 70: Les 4 niveaux de notre hiérarchie d'îlots routiers, et les types de routes correspondants.

Une fois les objets « route » triés, il faut générer les polygones représentant les îlots urbains. C'est à cette étape que nous faisons intervenir les réseaux ferrés et les cours d'eau, également extraits d'OSM.

Les rails représentent des éléments structurants non négligeables de la ville, et il semble donc nécessaire de les prendre en compte en même temps que les routes lors de la génération des îlots. Les rails sont aussi représentés par des lignes et possèdent une information concernant leur type : rails de trains ou rails de tramways. Nous assignons ce premier type à tous les niveaux hiérarchiques et le second qu'au niveau 4 car nous considérons que les rails de tramway sont moins structurants que celles de chemins de fer.

Avec ces lignes organisées selon 4 niveaux, nous générons un polygone pour chaque espace fermé, complètement encadré par celles-ci. Nous obtenons ainsi 4 ensembles de polygones partitionnant le même territoire à des échelles différentes.

Les cours d'eau sont représentés par des lignes possédant des informations de largeur. Nous nous servons de cette largeur pour dilater (grâce à la librairie GDAL) les lignes des cours d'eau importants (les rivières par exemple) et ainsi créer des polygones représentant la surface recouverte par ces cours d'eau. Nous soustrayons aux 4 ensembles de polygones précédemment générés ces polygones d'eau afin de marquer l'empreinte des cours d'eau (Figure 71).

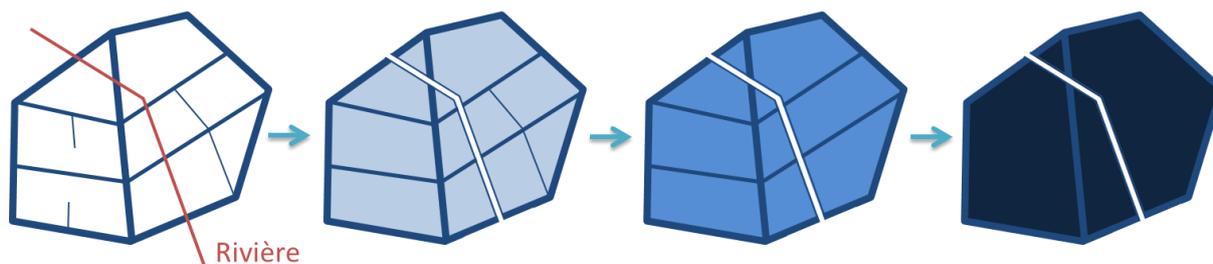


Figure 71: Prise en compte des cours d'eau importants dans la génération des îlots.

Cependant, puisque le partitionnement a pour but de répartir dans des zones distinctes les différents objets de la ville, ces îlots ne peuvent pas être utilisés en l'état car certaines routes (ou rails) possèdent des tronçons correspondant à des tunnels passant donc en dessous d'éléments de la ville. C'est par exemple le cas du tunnel de la Croix Rousse à Lyon, représenté Figure 72.



Figure 72: Tunnel de la Croix Rousse à Lyon qui passe en dessous de nombreux objets urbains.

Utiliser cette portion de route pour générer deux îlots distincts couperait en deux les éléments se trouvant au-dessus et génèrerait un partitionnement peu représentatif de la réalité puisque l'influence du tunnel sur le territoire se trouvant au-dessus de lui est nulle, ou au moins difficile à appréhender. Avec les jeux de données utilisés, ces tunnels peuvent être repérés facilement puisqu'un attribut booléen présent dans les données OSM permet de référencer cette information (mais seulement pour les routes, pas les rails). Simplement supprimer les tronçons de route correspondant à des tunnels aurait cependant des conséquences à plus grande échelle (des fusions non désirées d'îlots voisins), comme illustré dans la Figure 68 si nous considérons que le segment peu étroit correspond ici à un tunnel.

Nous préférons donc utiliser un filtre appliqué aux polygones déjà créés afin de réunir les îlots voisins contenant deux parties d'un même objet. Ainsi, nous empêchons les portions de tunnel d'avoir un impact indésirable sur les îlots, tout en évitant que leur correction n'ait de conséquences sur la route entière, et donc sur les îlots environnants. Cette étape nécessite l'utilisation de deux nouvelles couches de données issue d'OSM : les emprises au sol des

bâtiments et l'occupation des sols. Les emprises au sol des bâtiments permettront de repérer les îlots qui se partagent un même bâtiment afin de les réunir en un seul îlot. L'occupation des sols permettra de repérer certains éléments, comme les parcs par exemple, qui pourront alors être traités de la même manière afin de réunir les îlots se trouvant dans leurs emprises polygonales.

Sur les données du territoire de la ville de Lyon et selon la hiérarchie de routes définie Figure 70, nous obtenons le résultat présenté dans la Figure 73.

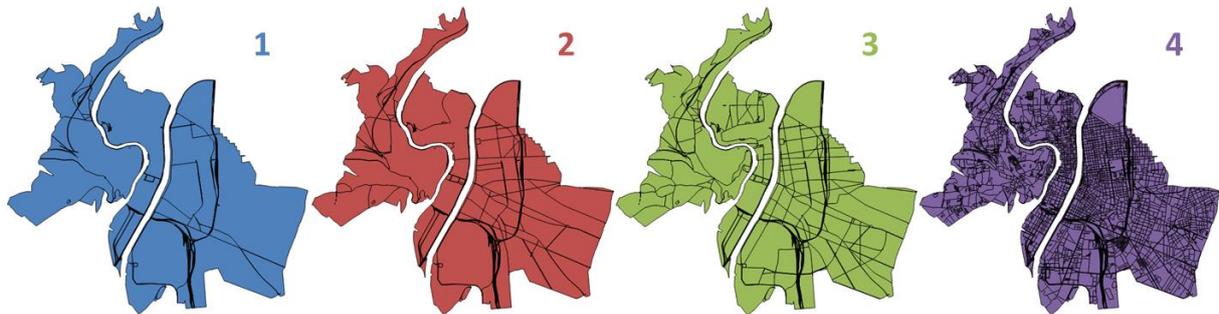


Figure 73: Hiérarchie d'îlots urbains constituée de 4 niveaux.

La dernière étape pour la mise en place de cette structure consiste simplement à générer la hiérarchie en mettant en place les liens entre les îlots fils et pères. Chaque îlot de niveau n contient ainsi un îlot père dans le niveau $n - 1$, et ainsi de suite jusqu'au niveau 1 qui représente les nœuds de plus haute importance.

Nous obtenons ainsi une partition hiérarchisée du territoire, et nous pouvons calculer des boîtes englobantes pour chaque élément afin de générer une hiérarchie de boîtes englobantes sur tout le territoire, dont le niveau le plus bas correspond aux objets urbains. Elle peut ainsi venir compléter la sBVH précédemment présentée qui s'intéresse au contenu de ces objets.

Nous avons également généré cette hiérarchie d'îlots urbains sur les données de la ville de Berlin et nous en présentons le résultat Figure 74. La ville est plus étendue, le réseau routier y est bien plus dense mais la méthode de génération des îlots urbains fonctionne également.

Seuls des critères purement sémantiques ont été utilisés afin de définir l'importance des éléments structurants de la ville, il serait néanmoins utile de proposer des paramètres géométriques qui pourraient s'avérer pertinents. Par exemple, nous pourrions tenter de regrouper les îlots de niveau n qui se « ressemblent » dans un îlot de niveau $n - 1$; cette notion de ressemblance étant définie selon des critères géométriques, par exemple selon la hauteur et la densité des bâtiments se trouvant sur l'îlot.

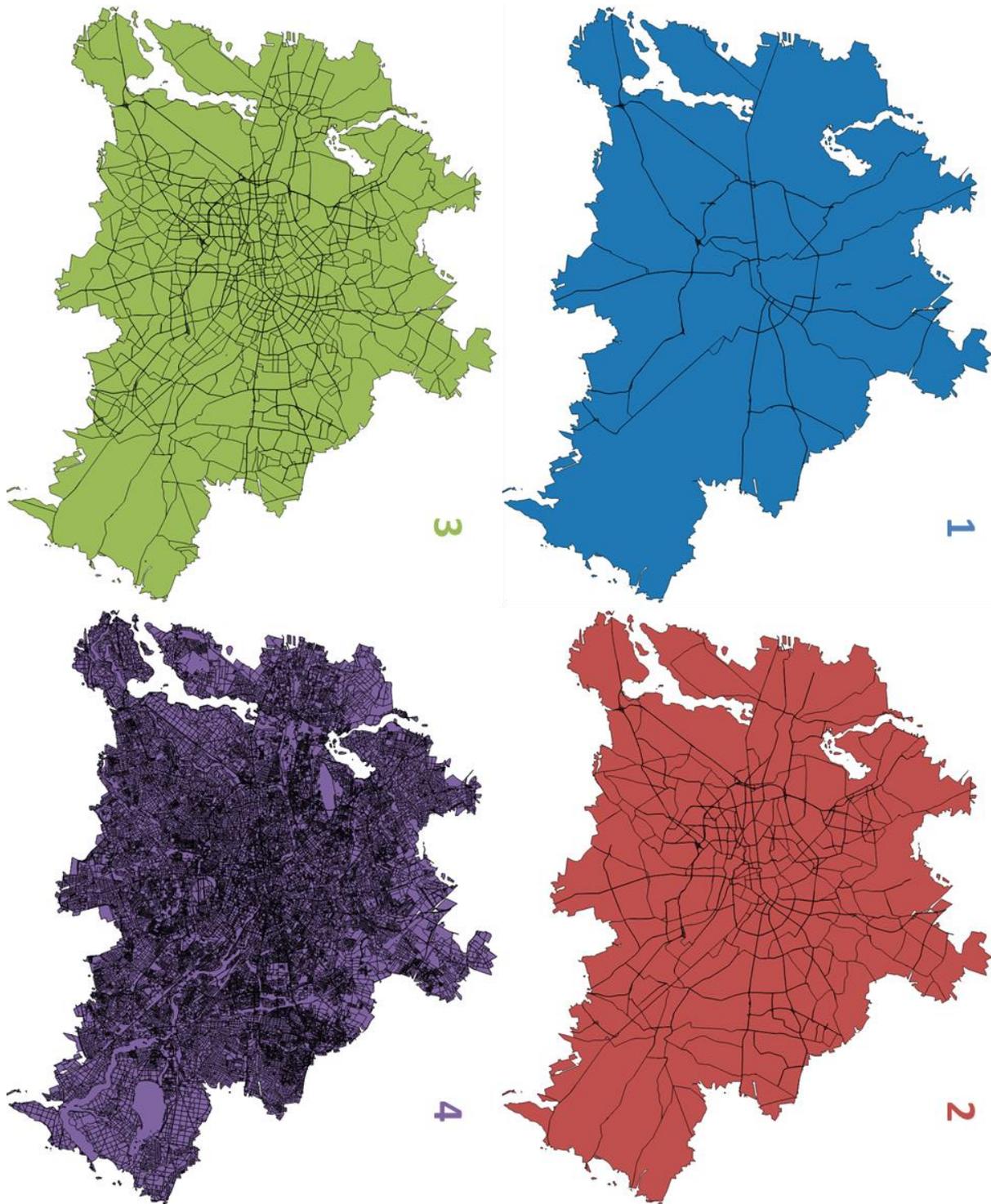


Figure 74: Génération de la hiérarchie d'îlots urbains sur la ville de Berlin.

3.2.4 Synthèse et applications

Cette section reprend des éléments présentés dans l'article suivant :

Gaillard J., Vienne A., Baume R., Pedrinis F., Peytavie A., Gesquière G. 2015. "Urban Data Visualisation in a web browser". Proceedings of the Twentieth International ACM Conference on 3D Web Technologies, 2015.

Nous avons présenté plusieurs structures permettant de structurer les données d'un modèle virtuel de la ville afin de faciliter son parcours et ainsi permettre des traitements sur des jeux de données de tailles importantes. Le tuilage en grille régulière et la hiérarchie d'îlots urbains permettent d'organiser les objets de la ville afin de produire des niveaux intermédiaires entre le modèle global de la ville et tous ses éléments, soit d'un point de vue purement géométrique, soit en utilisant la géométrie et la sémantique d'éléments structurants afin de représenter l'aspect visuel du territoire.

Ces deux organisations peuvent être utilisées de manière complémentaire avec la sBVH qui se base sur la structure hiérarchisée des objets de la ville afin de faciliter et accélérer leurs parcours. Ces organisations qui modélisent le territoire via des boîtes englobantes permettent de proposer une vue hiérarchisée de la ville et de ses éléments qui peut être exploitée dans un contexte de généralisation en complément avec les notions de niveaux de détails habituels des objets urbains. Cela permet par exemple de mettre en application la notion de niveaux d'abstraction présentée par [GD09], dont le but est de proposer une vue simplifiée faisant ressortir les monuments et aux autres objets considérés comme importants (hôpitaux, mairie, etc.). Ces éléments importants seront modélisés selon un niveau de détail élevé, contrairement aux autres éléments qui seront moins détaillés, voir simplifiés à l'échelle d'un îlot par exemple (un îlot constitué majoritairement de bâtiments sans importances pourrait être représenté par un simple volume correspondant à son emprise extrudée).

Nous avons vu que les structures de semantic Bounding Volume Hierarchy et de hiérarchies d'îlots urbains proposées ont une efficacité limitée sur la gestion du terrain, mais qu'avec les terrains relativement peu résolus en notre possession le tuilage s'avère suffisant (le terrain est beaucoup moins lourd en nombre de triangles que les bâtiments ou la végétation par exemple). Il serait néanmoins envisageable de s'inspirer de travaux déjà existants proposant des méthodes plus élaborées de gestion de terrain, notamment dans des contextes de rendus.

Par exemple, [Hop98] et [LP02] proposent d'adapter le raffinement du maillage du terrain en fonction de la position de la caméra : un maillage dense sera utilisé pour le terrain proche alors que ce qui est vu de loin peut être simplifié (diminution du nombre de triangles) sans réelle perte de qualité visuelle pour l'utilisateur.

Ces stratégies pourraient par exemple être exploitées en utilisant des maillages (progressivement) simplifiés pour le terrain situé dans des tuiles jugées comme suffisamment lointaines du point de vue étudié. Cependant, ceci introduirait une vision différente de ce que nous avons proposé jusque-là pour un gain final assez limité puisque le terrain est déjà rapide à traiter en comparaison des autres éléments de la ville. Dans les structures de données que nous proposons, nous nous contentons d'organiser les objets de la ville et la géométrie 3D qui leur est liée. Nous ne modifions pas ces géométries, et nous ne les complétons pas. Nous ne changeons pas le modèle virtuel en lui-même, nous lui adjoignons juste des hiérarchies et des boîtes englobantes permettant de pouvoir le parcourir plus efficacement.

Mettre en place plusieurs niveaux de détails du maillage du terrain nécessiterait par contre de modifier le modèle en lui-même, en proposant plusieurs versions de sa géométrie (en stockant chaque niveau de détail ou les opérations de raffinement permettant de les générer). Cela peut poser problème puisque nous travaillons dans un contexte d'interopérabilité et nous ne souhaitons donc pas modifier localement le contenu d'un modèle virtuel en faisant évoluer sa géométrie par exemple. Cela aurait pour potentielle conséquence de perdre cette interopérabilité en s'éloignant du standard utilisé. De plus, utiliser des méthodes de simplification visant uniquement à réduire le nombre de triangles pour générer de multiples niveaux de détails rendrait ceux-ci inadaptés à certaines problématiques exploitant des modèles virtuels de la ville. Réduire le nombre de triangles du terrain pourrait par exemple empêcher les bâtiments de correctement se positionner sur celui-ci et créerait des incohérences.

Puisqu'il semble difficile de créer des niveaux de détails basés sur la géométrie dans un contexte de modèle urbain, nous pourrions plutôt exploiter les niveaux de détails définis dans certains standards comme le CityGML. Plusieurs freins viennent cependant compliquer ceci : premièrement, la notion de niveaux de détails des modèles urbains n'est pas forcément équivalente à celle répandue dans des thématiques de rendus traditionnelles. Deux niveaux de détails ne se distinguent pas uniquement par leur nombre de triangles ou de polygones qui les composent, la sémantique évolue également en proposant différents niveaux d'éléments qui

composent un objet urbain (apparition des objets « fenêtres » des bâtiments en montant de niveau par exemple). De plus, le passage d'un LoD à l'autre ne garantit pas nécessairement une diminution du nombre de triangles (même si ce sera vraisemblablement toujours le cas, ce n'est pas une condition particulière), et la géométrie peut radicalement changer d'un niveau à l'autre (dans l'exemple des bâtiments, nous passons d'une emprise au sol à une boîte puis à un bâtiment composé de toits modélisés en 3D).

Concernant le standard CityGML, les niveaux de détails ne sont actuellement pas encore correctement définis pour tous les différents types d'objets (ils concernent essentiellement les bâtiments) et il manque donc des travaux permettant d'uniformiser la notion de niveaux de détails à tous les objets. Enfin, les méthodes d'acquisition actuelles ne permettent pas de produire des jeux de données de modèles virtuels de villes contenant plusieurs niveaux de détails qui permettraient l'exploitation de ceux-ci par une structure accélératrice. Bien que le standard CityGML permette la définition de bâtiments avec de nombreux détails aussi bien extérieurs qu'intérieurs, il n'existe aucun jeu de données réel à l'échelle d'une ville proposant une telle modélisation. C'est pour ces différentes raisons qu'un simple tuilage a été utilisé pour partitionner et structurer le terrain des modèles urbains 3D.

Dans le cadre d'un outil de visualisation, nos structures proposées peuvent également permettre de définir des stratégies d'affichage des données en proposant des gestionnaires différents des groupements d'objets (tuiles ou îlots) selon leur distance à la caméra.

L'organisation en tuiles régulières a ainsi été utilisée dans le cadre du développement d'Urban Data Viewer (UDV⁴⁸), qui est un outil libre proposé par le laboratoire LIRIS permettant de visualiser des modèles 3D de la ville via un navigateur web. La Figure 75 représente son architecture globale, qui est basée sur un serveur léger développé en JavaScript, et qui utilise WebGL pour gérer le rendu de la scène 3D.

Cet outil est conçu notamment dans le but de pouvoir visualiser des modèles définis selon le standard CityGML, qui sont tuilés et convertis en fichiers JSON avant d'être stockés sur le serveur. Le tuilage selon une grille régulière permet ensuite la mise en place d'une stratégie de chargement des données dans le navigateur web, qui peut être paramétrée par l'utilisateur. La Figure 76 illustre cette stratégie qui détermine quelles sont les tuiles à afficher en fonction de la position et de l'orientation de la caméra. Les tuiles proches sont chargées en priorité tandis que les tuiles plus lointaines sont affichées avec moins de détail, et cet affichage se met

⁴⁸ <https://github.com/MEPP-team/UDV>

à jour à chaque mouvement de la caméra en déchargeant également les tuiles qui ne sont plus nécessaires. Il est ainsi possible de pouvoir se déplacer dans tout le territoire de manière fluid

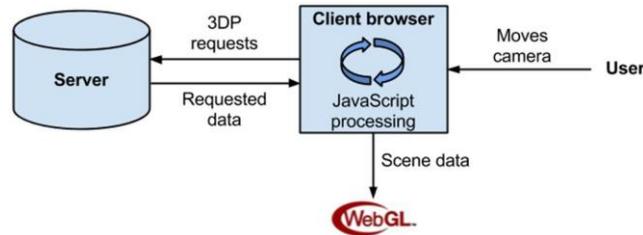


Figure 75: Architecture globale de l'outil Urban Data Viewer.

e même sur une machine peu puissante en maîtrisant les zones à charger et afficher.

De plus, cet outil permet d'accéder à la sémantique éventuellement présente dans le modèle en entrée et gère également les nuages de points LiDAR ainsi que des flux de données grâce au protocole Web Feature Service (WFS⁴⁹) de l'OGC.

Dans l'évolution d'UDV, nous développons maintenant un outil web basé sur iTowns⁵⁰ pour le côté client, dans le cadre de la thèse de Jérémy Gaillard⁵¹. Nous y avons notamment incorporé l'organisation en îlots hiérarchisés présenté précédemment afin de proposer une stratégie de visualisation dynamique selon différents niveaux de détails des bâtiments de ces îlots. La hiérarchie d'îlots urbains permettra ainsi de créer des représentations simplifiées de la ville, tout en s'appuyant sur les caractéristiques du territoire étudié. Elles permettront de proposer des vues reconnaissables par l'utilisateur malgré leurs simplicités géométriques.

En dehors de ces stratégies d'affichage dans un contexte de visualisation, le tuilage en grilles régulières nous semble préférable pour permettre le passage à l'échelle de traitements sur l'ensemble d'un territoire urbain.



Figure 76: Stratégie d'affichage basée sur le tuilage du modèle virtuel.

⁴⁹ <http://www.opengeospatial.org/standards/wfss>

⁵⁰ <http://www.itowns-project.org/>

⁵¹ <https://liris.cnrs.fr/membres?idn=jgaillard>

4. Mesurer la ville

Les différentes structures de données proposées permettront d'utiliser des traitements sur un territoire très vaste grâce au partitionnement hiérarchique de celui-ci. Nous avons présenté précédemment des traitements améliorant les modèles 3D de la ville qui peuvent exploiter ces structures organisatrices, nous allons maintenant nous intéresser à des analyses du territoire urbain qui permettent de mieux l'appréhender.

Le premier type d'analyse consiste à comparer des modèles générés à deux dates distinctes afin de détecter les changements, ce qui ne nécessite pas de structure organisatrice particulière en dehors du fait de pouvoir traiter un territoire entier sans être limité par l'empreinte mémoire nécessaire au chargement des objets de la ville. Un simple tuilage suffira donc pour permettre le passage à l'échelle de ces traitements.

Nous allons ensuite présenter des analyses visant à qualifier le territoire en proposant des indicateurs liés à la visibilité puis à l'ensoleillement et à l'ombre. Elles nécessitent également de pouvoir être générées depuis tout le territoire, et ont donc besoin d'une structuration efficace des données. Cependant, contrairement à une détection de changements qui agit localement (elle compare des objets ayant la même localisation), ces analyses font elles-mêmes intervenir le territoire dans sa globalité puisque l'impact d'un objet en termes de visibilité et d'ombre peut s'étendre sur de très grandes zones. Il est donc nécessaire d'utiliser une structure de données permettant de parcourir efficacement le modèle virtuel en termes de géométrie mais également de sémantique.

La plupart des objets de la ville ont un impact visuel, dont les ombres qu'ils génèrent au cours de la journée. Les modèles améliorés grâce aux méthodes précédemment présentées augmenteront ainsi la pertinence des indicateurs qui seront générés, soit en proposant de nouveaux types d'objets, soit en précisant la définition sémantique de ceux-ci permettant de meilleurs résultats.

4.1 Détections de changements

Cette section reprend des éléments présentés dans l'article suivant :

Pedrinis, F., Morel, M., & Gesquière, G. (2015). "Change detection of cities". In 3D geoinformation science (pp. 123-139). Springer International Publishing. p. 123-139.

Les modèles virtuels 3D de la ville sont généralement stockés par millésimes qui représentent la situation de la période à laquelle ils ont été acquis. Ce nombre de millésimes augmentant, il est aujourd'hui nécessaire de proposer des méthodes de gestion efficace de ces jeux de données en prenant en compte l'aspect temporel de leurs éléments.

Il est probable qu'entre deux périodes d'acquisition, une partie non négligeable du territoire soit restée inchangée et qu'il ne soit donc pas nécessaire de stocker deux modélisations « identiques » de ces zones. Il serait ainsi préférable de mettre en place un unique modèle 3D de la ville, capable de stocker plusieurs versions de ses objets afin de prendre en compte les changements apparus au cours du temps. Ainsi, chaque nouvelle acquisition viendra compléter ce modèle en apportant son lot de modifications qui seront datées en conséquence (et qui pourront éventuellement être précisés par la suite via l'utilisation de données spécifiques proposant une date plus précise se situant entre les deux périodes d'acquisitions).

Mettre en place cette amélioration pose cependant deux problèmes : il faut être capable de lier aux objets des périodes temporelles permettant de définir leur existence, et il faut être capable de détecter automatiquement les changements apparus entre les deux acquisitions afin de mettre à jour le modèle en conséquence. Même s'il est envisageable que l'acquisition la plus récente soit tout de même intégrée si sa géométrie est plus précise (les capteurs et les méthodes de traitement des leurs données s'améliorent continuellement), il faut être capable de détecter pour chaque objet si c'est juste une mise à jour de sa géométrie (car la plus récente est jugée plus précise), si c'est une modification de l'objet en lui-même (ajout d'un étage, d'une extension, etc.), ou s'il doit être considéré comme supprimé pour être potentiellement remplacé par un objet nouvellement créé. Il est à noter que la capacité de gérer plusieurs versions d'un objet ne doit pas concerner uniquement sa géométrie 3D, il est également nécessaire de pouvoir renseigner d'éventuels changements de texture (à cause d'un ravalement de façade par exemple) ou d'informations sémantiques (pour un changement de propriétaire par exemple).

Concernant le premier point, une gestion temporelle de données CityGML (présentée à la fin de la section 2.1.4) a été proposée par notre équipe dans [MG14] et [CSG+17]. Elle permet de prendre en compte des modèles 3D temporels de la ville en définissant pour chaque objet une période d'existence pouvant être partitionnée en un ensemble d'états distincts qui représentent son évolution. C'est pour répondre au second point que nous avons proposé des méthodes permettant de détecter les changements apparus sur les bâtiments.

Nous nous sommes pour cela intéressés à deux types de représentation : un modèle 3D contenant des bâtiments modélisés selon le LoD2 du standard CityGML, et un nuage de point aérien LiDAR. Nous allons commencer par présenter une méthode de comparaison entre les bâtiments de deux modèles 3D acquis à des dates différentes, puis entre les bâtiments d'un modèle 3D et ceux d'un LiDAR, avant de finir par comparer les bâtiments de deux nuages de points LiDAR.

Les modèles temporels générés ont notamment servi aux historiens, urbanistes et géographes participant aux projets Alaric⁵², Vilo3D⁵³ et FAB-PAT⁵⁴.

4.1.1 Comparaison de modèles 3D de bâtiments

La première méthode proposée permet de comparer deux modèles 3D de bâtiments représentés selon le LoD 2 du standard CityGML. Elle compare les modèles générés à deux dates d'acquisition différentes afin de détecter les évolutions et classer les bâtiments en 4 catégories : les bâtiments qui ont été inchangés, modifiés, détruits ou construits durant cette période. Nous allons tout d'abord pour cela utiliser les emprises au sol des bâtiments afin de détecter ceux qui doivent être comparés puisque situés au même endroit. Ces mêmes emprises au sol permettront de produire une première comparaison simple qui distinguera plusieurs cas. Ils seront ensuite traités plus en détail en comparant les géométries 3D des bâtiments concernés qui pourront alors être catégorisés.

Puisque le modèle est constitué de bâtiments modélisés selon le LoD 2 du standard CityGML, les toits sont caractéristiques de la forme de chaque bâtiment car les murs n'en sont que des projections verticales vers le sol. Nous pouvons donc calculer les emprises au sol des bâtiments en projetant les polygones de toit sur une surface horizontale (la méthode de

⁵²<http://imu.universite-lyon.fr/projet/alaric-du-passe-ne-faisons-pas-table-rase-a-la-recherche-de-lincrémentation-du-changement/>

⁵³ <http://www.ens-lyon.fr/tout-l-agenda/les-donnees-urbaines-quelles-pratiques-et-quels-savoirs--327391.kjsp>

⁵⁴<http://imu.universite-lyon.fr/projet/fab-pat-partager-la-fabrique-du-patrimoine-approche-et-enjeux-du-paysage-urbain-historique-puh/>

génération des emprises au sol depuis les polygones de toit d'un bâtiment en LoD2 est présentée en Annexe 1). Nous illustrons ceci dans la Figure 77, où sont représentées les emprises au sol A1, A2 et A3 des bâtiments du premier modèle 3D, et celles de B1, B2 et B3 appartenant au second.

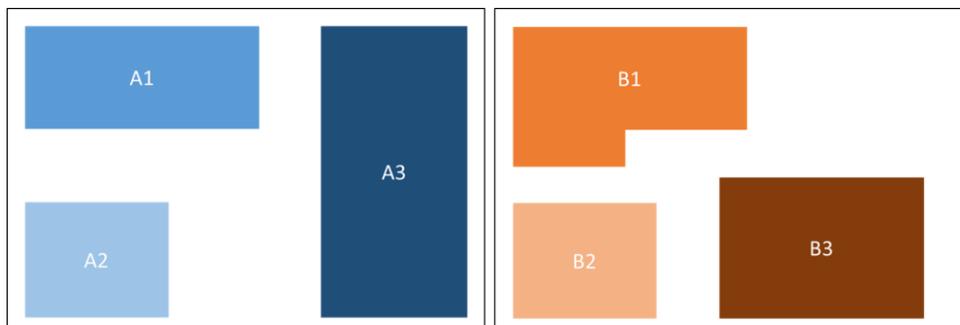


Figure 77: Emprise au sol des bâtiments des deux modèles de la même zone à comparer.

La première étape consiste à lier les emprises au sol qui se superposent entre les deux millésimes, c'est-à-dire lorsque leurs polygones s'intersectent (même sur une petite surface). En supposant que les données sont localisées dans le même système de référence spatial, la mise en relation se fait de manière immédiate et nous sommes donc capables de lier les bâtiments qui se superposent. La Figure 78 illustre cette superposition qui nous fournit ici les relations A1-B1, A2-B2 et A3-B3. Cela signifie que pour la suite, nous allons nous intéresser à comparer ces groupes de bâtiments de manière isolée (un groupe pourrait contenir plus de 2 éléments).

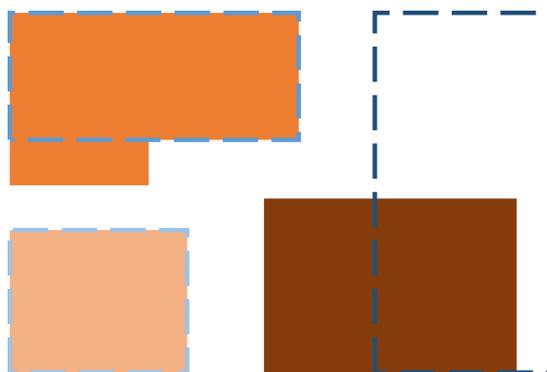


Figure 78: Superposition des emprises au sol.

Des premiers cas peuvent rapidement être traités. En effet, les bâtiments ne trouvant pas d'équivalent dans l'autre millésime sont directement classés dans l'une des catégories de bâtiments détruits ou construits, selon leurs dates respectives. Par exemple, si un bâtiment issu du modèle le plus ancien ne correspond à aucun bâtiment du plus récent, cela signifie qu'il a été détruit dans la période séparant les deux acquisitions, et nous pouvons donc déjà le catégoriser en conséquence.

Nous allons maintenant nous intéresser aux bâtiments issus des deux millésimes qui ont des emprises au sol qui se superposent. Les étapes mises en place sont proposées dans la Figure 79.

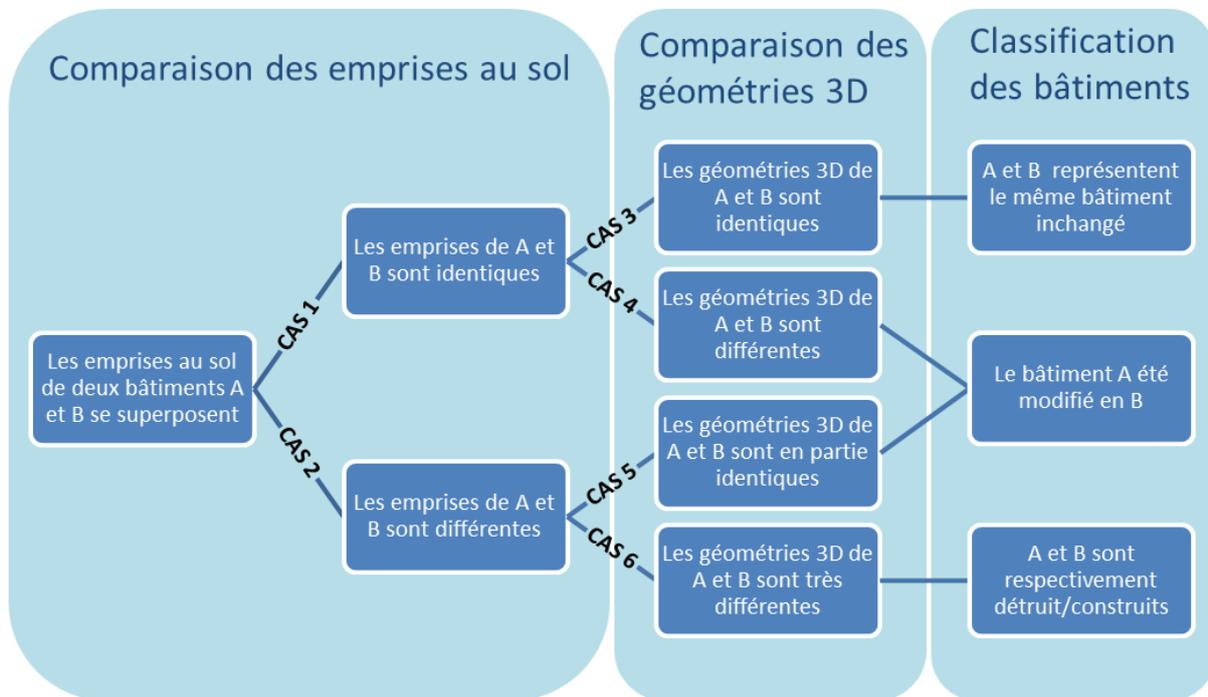


Figure 79: Etapes permettant de trier les différents cas parmi deux bâtiments A et B dont les emprises au sol se superposent.

Nous commençons par calculer l'intersection des polygones représentant les emprises au sol pour chaque couple de bâtiments qui ont été reliés, afin d'avoir une première estimation de leur ressemblance à partir de leurs surfaces au sol. En effet, un bâtiment inchangé nécessite forcément une emprise au sol identique (avec une certaine marge d'erreur liée aux différences d'acquisition) dans chacun des deux modèles. Ce test permet donc de faire une première distinction parmi les différents cas (cas 1 ou cas 2 selon la Figure 79). La Figure 80 représente le polygone d'intersection I (en orange) pour le couple A3-B3 (respectivement en bleu et en marron).

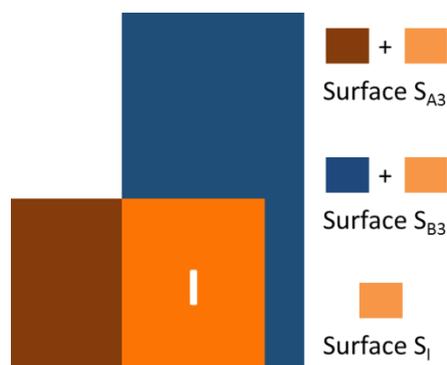


Figure 80: Polygone d'intersection (orange) entre A3 (bleu) et B3 (marron) de la Figure 77.

Une première mesure de ressemblance se base sur les aires de ces trois polygones. Soit S_{A3} la surface du polygone A3, S_{B3} celle du polygone B3 et S_I celle du polygone I représentant l'intersection entre A3 et B3. Nous calculons deux différences ($d1$ et $d2$) et deux rapports ($r1$ et $r2$) présentés ci-dessous qui nous permettent de déterminer si les deux emprises au sol peuvent être jugées identiques ou non.

$$d1 = S_{A3} - S_I \text{ et } d2 = S_{B3} - S_I$$

$$r1 = \frac{d1}{S_I} \text{ et } r2 = \frac{d2}{S_I}$$

Les emprises au sol A3 et B3 sont jugées identiques si $r1$ et $r2$ sont inférieurs à un coefficient ε_1 dont la valeur doit prendre compte les nombreuses différences pouvant exister entre les deux jeux de données (ils ont été acquis séparément donc la méthode utilisée n'est peut-être pas la même, les résolutions non plus, etc.). Il faut également que $d1$ et $d2$ soient inférieurs à un certain seuil de surface ε_2 . Cette seconde vérification intervient pour les bâtiments possédant une grande surface (au moins $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$) où un simple pourcentage ne suffit plus. En effet, nous considérons qu'à partir d'une certaine surface modifiée, le changement est suffisamment important pour que les emprises au sol ne puissent plus être qualifiées d'identiques (cela ne peut plus être considéré comme étant dû à des erreurs d'acquisition), peu importe la surface totale du bâtiment concerné.

Dans les couples de notre exemple introduit Figure 77, seul A2-B2 vérifie ces conditions, puisque A1 se retrouve entièrement dans B1 mais la réciproque n'est pas vraie. Cela signifie que ces emprises au sol A2 et B2 sont inchangées entre les deux dates.

Cas 1 : les emprises au sol sont identiques

La seconde étape fait ensuite intervenir les géométries 3D de ces bâtiments afin de proposer une réelle comparaison de ces modèles et ainsi détecter les éventuels changements. Un test sur les emprises au sol n'est pas suffisant puisqu'un bâtiment a pu être détruit et remplacé par un autre possédant la même emprise, ou le bâtiment a pu être modifié en hauteur, tel un immeuble en construction qui prend des étages au cours de sa construction.

Soit A et B deux bâtiments dont les emprises au sol ont été jugées identiques, nous allons maintenant nous intéresser à comparer leurs géométries 3D afin de déterminer si les deux bâtiments sont identiques (donc inchangés – cas 3 de la Figure 79) ou non (donc modifiés – cas 4).

Pour quantifier cette ressemblance en 3D, nous proposons de calculer une distance de Hausdorff (dH) permettant de mesurer les différences entre deux géométries 3D. La distance de Hausdorff calculée entre deux maillages triangulaires permet d'obtenir la plus grande distance séparant un point donné de l'autre maillage. La méthode de calcul employée est présentée en détail dans l'Annexe 2. Ce calcul se base uniquement sur les polygones 3D du toit composant ces géométries, puisque nous rappelons que le toit suffit à définir entièrement le modèle 3D du bâtiment. Cela nécessite cependant que tous les polygones de toit soient des triangles et une triangulation peut donc s'avérer nécessaire en fonction des modèles étudiées.

Ce calcul est relativement lourd pour des maillages complexes, mais grâce au pré-filtrage réalisé au niveau des emprises au sol et au fait que l'on ne prenne en compte que les toits, les maillages concernés sont relativement simples. Il existe d'autres méthodes permettant de comparer des maillages triangulaires, tels que celles comparées par [CLL+13]. Néanmoins, nous sommes ici dans un cas relativement simple avec des maillages à comparer peu complexes et nous avons donc choisi la distance de Hausdorff qui nous semble adaptée pour comparer les maillages de toits. Les méthodes citées par [CLL+13] prennent en compte des paramètres extérieurs qui ne rentrent pas en compte dans le contexte actuel. Par exemple, les métriques liées à la perception et à la position de la caméra ne sont pas pertinentes ici puisque nous souhaitons seulement détecter les changements liés à la géométrie.

A et B sont considérés comme représentant le même bâtiment inchangé entre les deux dates si cette valeur maximale est inférieure à une valeur ϵ_3 . Sinon, A et B sont considérés comme modifiés car ils ont la même emprise au sol, mais ont des différences en « hauteur ».

Cas 2 : les emprises au sol sont différentes

Il reste alors à classer les groupes de bâtiments dont les emprises au sol s'intersectent de manière imparfaite, entre la catégorie de bâtiments modifiés (cas 5) et celles de bâtiments détruits/construits qui sont ici liées (cas 6). En effet, puisque deux (ou plus) bâtiments se trouvent au même endroit, cela signifie qu'un bâtiment construit va forcément de pair avec un bâtiment détruit du millésime plus ancien (et vice versa).

Afin de distinguer ces deux possibilités pour un couple de bâtiments que l'on souhaite comparer, nous cherchons les parties communes dans lesquelles la géométrie 3D est identique entre les deux modèles. Si la surface couverte par des géométries 3D identiques est suffisamment importante pour pouvoir considérer qu'une partie du bâtiment est restée identique alors nous jugeons le bâtiment comme ayant été seulement modifié entre les deux

dates. Nous considérons en effet qu'un couple de bâtiments détruit/construit ne conservera pas une section étendue parfaitement identique, et qu'une telle section serait alors représentative d'un bâtiment qui n'a pas totalement été détruit mais seulement modifié.

Soit deux bâtiments A et B respectivement issus des deux millésimes et mis en relation par leurs emprises au sol. Grâce à la comparaison de ces emprises au sol, nous connaissons la surface commune que possèdent ces deux bâtiments, et nous savons également que celle-ci n'est pas suffisamment importante pour que ces emprises au sol puissent être qualifiées d'identiques. Nous devons donc comparer leurs géométries 3D se trouvant dans ces zones communes afin de détecter les zones réellement identiques. Parmi les polygones 3D composant les toits des bâtiments A et B, nous récupérons ceux se trouvant (même partiellement) dans la zone commune aux deux bâtiments (Figure 81). Nous obtenons ainsi une liste de polygones T_a issus du bâtiment A qui s'intersectent en 2D avec au moins l'un des polygones T_b de B (et vice versa). Pour un tel couple T_a - T_b , nous calculons le polygone d'intersection 2D que l'on nomme P. P est ensuite projeté en 3D sur chaque polygone T_a et T_b afin de créer P_a et P_b . P_a (respectivement P_b) représente ainsi la partie de A (resp. B) qui est présente en 2D dans B (resp. A).

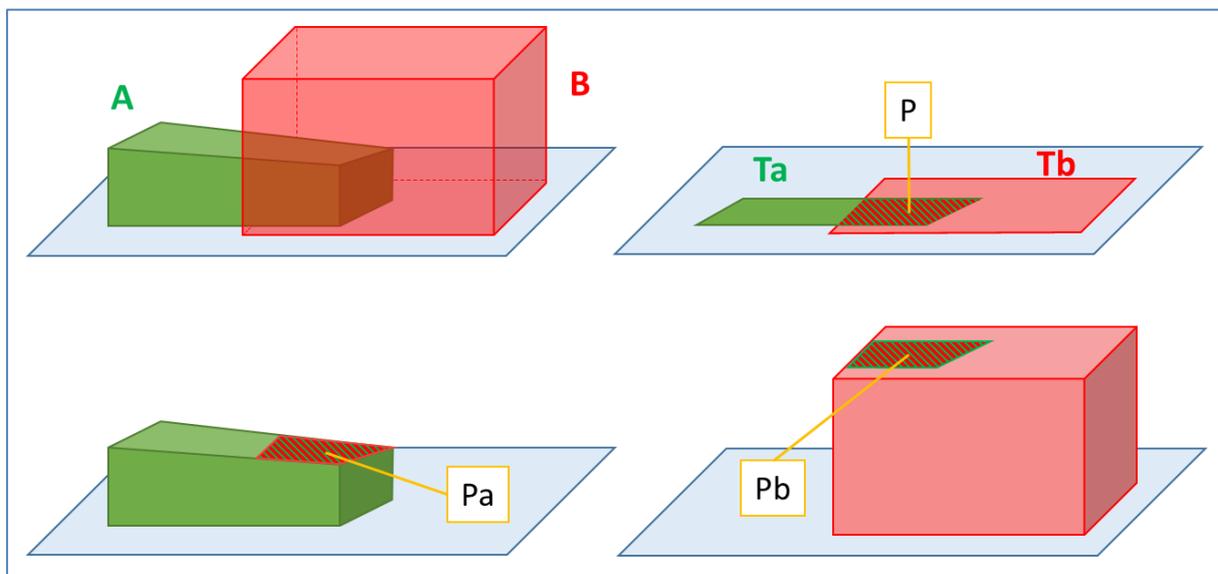


Figure 81: Comparaison des zones partagées entre deux bâtiments distincts.

La dernière étape consiste alors à calculer la distance de Hausdorff entre P_a et P_b (via une éventuelle triangulation initiale) afin de déterminer si la zone représentée en 2D par P est commune ou non aux deux bâtiments. Dans notre implémentation, nous considérons que la zone est commune si la distance de Hausdorff est inférieure à ϵ_3 (c'est-à-dire que les toits des deux bâtiments sont espacés au maximum de ϵ_3 en hauteur sur la zone représentée par P).

Après avoir parcouru tous les polygones des deux bâtiments, nous sommes en mesure de déterminer précisément la surface sur laquelle ils sont identiques. Si cette surface est suffisamment importante, nous considérons qu'une partie non négligeable de l'ancien bâtiment se retrouve dans le nouveau et qu'ils ne peuvent donc être assimilés à un couple détruit/construit. Cette valeur de surface minimale peut être soumise à discussion, notamment avec des urbanistes, mais dans notre cas nous considérons que si deux bâtiments sont géométriquement identiques sur une zone supérieure à 10m² alors cela signifie que le bâtiment ancien n'a pas totalement été détruit.

Nous classons alors ces bâtiments dans la liste des bâtiments modifiés. Si la zone commune est nulle ou s'étend sur une surface trop faible, nous considérons que les deux bâtiments ne sont pas liés, et donc que l'ancien est un bâtiment détruit alors que le nouveau est un bâtiment construit.

Grâce aux différentes étapes de comparaison proposées, nous avons bien classé tous les bâtiments des deux millésimes dans 4 catégories : bâtiments inchangés, modifiés, détruits et construits. Avec cette catégorisation, il est ensuite possible de mettre en place un modèle 3D dont les objets peuvent contenir plusieurs versions. C'est le cas des bâtiments modifiés pour lesquels il est nécessaire de stocker les deux versions en liant cette modification à une information temporelle. Les bâtiments détruits et construits seront eux simplement renseignés avec les dates correspondantes (date de construction ou de destruction).

Toute cette méthode repose sur la définition des bâtiments, et il est donc nécessaire que celle-ci soit juste afin de proposer des résultats pertinents. La pertinence de la catégorisation augmentera ainsi avec l'amélioration de la définition sémantique des objets bâtiments, en utilisant par exemple la méthode précédemment présentée. Pour le cas illustré dans la Figure 82, si le modèle 3D correspond à un unique bâtiment alors celui-ci sera entièrement catégorie comme étant « modifié ». Cependant, en regardant le cadastre correspondant, nous constatons que cette géométrie 3D représente finalement trois bâtiments distincts, et que celui du milieu a évolué entre les deux dates d'acquisition. En ayant utilisé le cadastre pour améliorer le modèle 3D, il est ainsi possible de différencier les trois bâtiments et d'assigner à la catégorie des bâtiments modifiés uniquement celui du milieu, alors que les deux autres seront considérés comme inchangés.

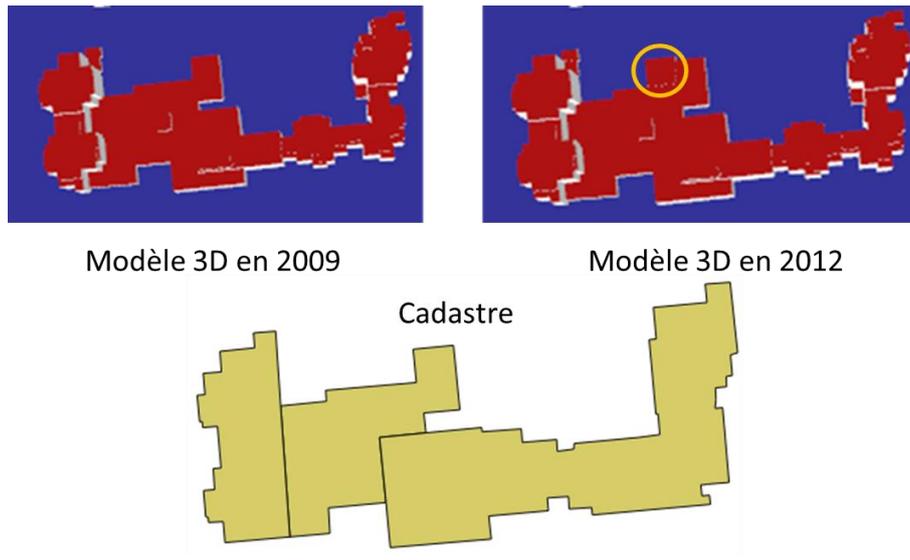


Figure 82: Deux modèles 3D issus de deux dates distinctes, et le cadastre correspondant à la première date.

Un certain nombre de variables discriminantes sont utilisées et peuvent être modifiées en fonction des données utilisées. Ces valeurs peuvent dépendre des précisions des données, de la tolérance recherchée ou de l'architecture générale de la zone étudiée. Suite à nos discussions avec la métropole de Lyon sur les données et les méthodes d'acquisition, nous avons décidé de fixer ε_1 à 0.01, ε_2 à 5 (m²) et ε_3 à 1 (m) pour les tests utilisant leurs données que nous allons présenter.

Nous illustrons les résultats de cette méthode sur deux zones de densités urbaines différentes. Elles représentent la ville de Sathonay Camp et le 4^{ème} arrondissement de la ville de Lyon, dont nous avons comparé les millésimes 2009 et 2012 des modèles 3D librement accessibles sur le site de la Métropole de Lyon⁵⁵ ⁵⁶. Nous obtenons pour Sathonay Camp les résultats illustrés dans la Figure 83.

⁵⁵ <https://data.grandlyon.com/localisation/maquette-3d-texturfe-de-la-commune-de-sathonay-camp-la-mftropole-de-lyon/>

⁵⁶ <https://data.grandlyon.com/localisation/maquette-3d-texturfe-de-larrondissement-de-lyon-4f-la-mftropole-de-lyon/>

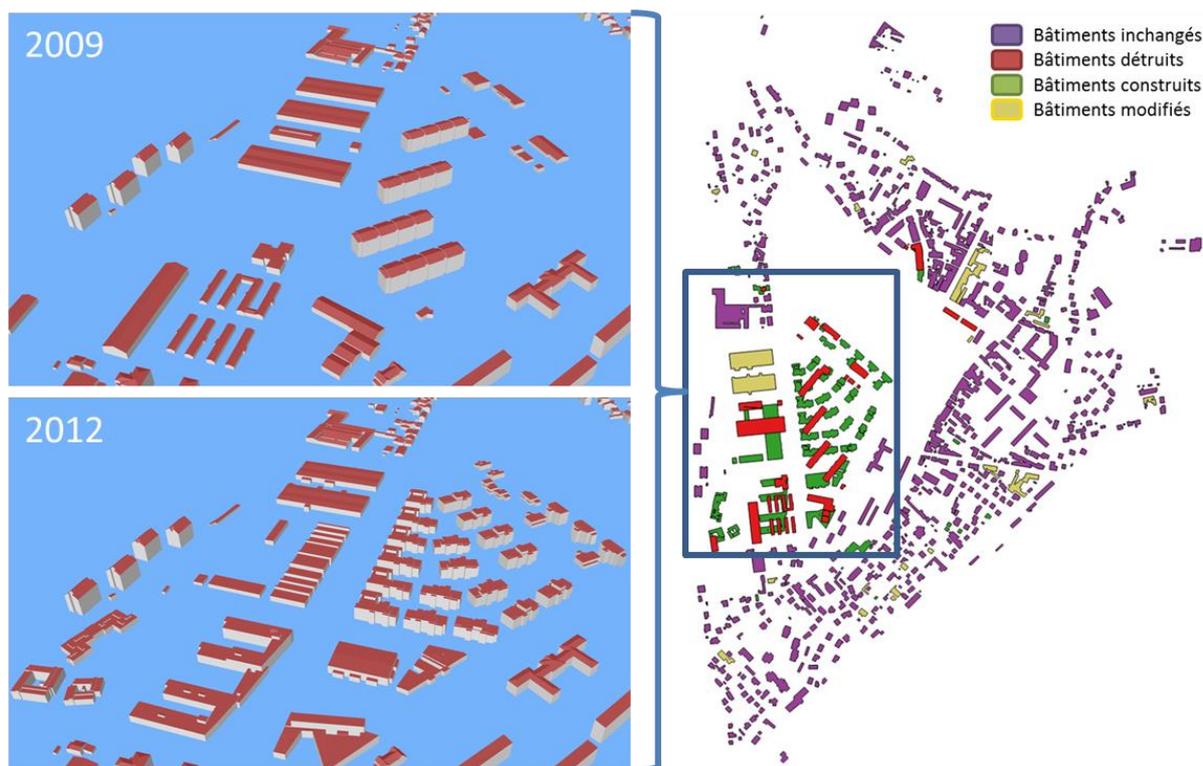


Figure 83: Comparaison des millésimes 2009 et 2012 de la ville de Sathonay Camp.

Nous pouvons constater que le centre de Sathonay Camp a subi des changements importants se traduisant par la destruction de tout un ensemble de bâtiments et la construction de nouveaux. Sur ce jeu de données, nous avons pu comparer notre méthode avec une comparaison manuelle (s'intéressant uniquement aux emprises au sol) réalisée par la Métropole de Lyon sur Sathonay Camp⁵⁷ à partir de photographies aériennes, dont les résultats sont présentés Figure 84.

Nous pouvons notamment constater que quasiment tous les bâtiments détectés comme détruits ou construits sont bien retrouvés par notre méthode automatique. Il manque cependant quelques bâtiments qualifiés de détruits par les opérateurs de la métropole, mais nous avons constaté que ceux-ci étaient finalement absents du modèle 3D traité, ce qui justifie cette différence.

Le jeu de données du 4ème arrondissement de la ville de Lyon correspond à un centre-ville, où de nombreux bâtiments correspondent à de multiples éléments voisins les uns des autres. Nous avons donc appliqué la méthode précédemment présentée afin de les découper selon les emprises au sol du cadastre dans le but de proposer une définition plus fine de la notion de « bâtiment ». Nous avons ensuite utilisé notre méthode de détection de changements sur les

⁵⁷ <https://data.grandlyon.com/localisation/bftiments-construits-entre-2009-f-2012-grand-lyon/>

deux versions, avec et sans le découpage par le cadastre, afin de pouvoir comparer les résultats. Ceux-ci sont respectivement illustrés dans les Figure 85 et Figure 86.



Figure 84: Détection de changements sur la ville de Sathonay Camp réalisée manuellement par la Métropole de Lyon.

Nous pouvons notamment remarquer la meilleure granularité des résultats après la découpe des bâtiments par le cadastre. Les modifications détectées sont mieux localisées et les bâtiments directement voisins ne sont plus impactés par celles-ci. De plus, certains bâtiments qui étaient considérés à tort comme inchangés, car leurs changements étaient négligés lorsque les bâtiments étaient fusionnés avec leurs voisins, sont maintenant correctement détectés comme ayant été modifiés.

Le Tableau 5 donne les temps de calcul et les caractéristiques des trois jeux de données étudiés. Ces temps de calcul sont directement dépendants du nombre de triangles des bâtiments à comparer.

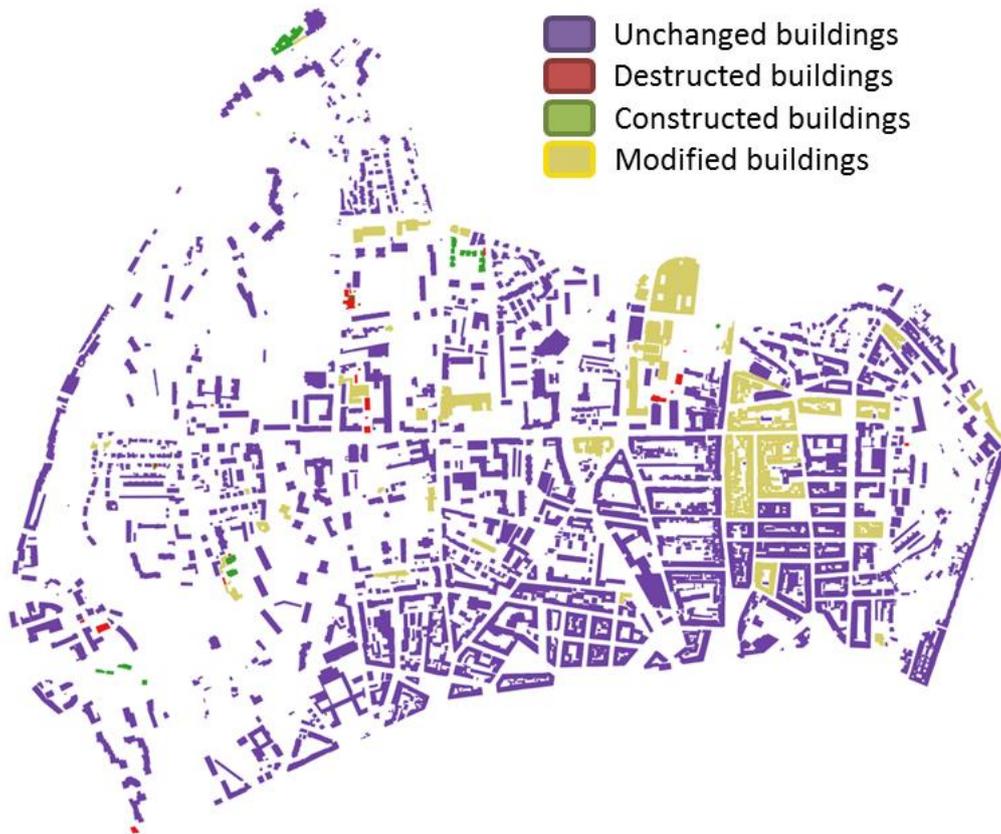


Figure 85: Comparaison des millésimes 2009 et 2012 des bâtiments du 4ème arrondissement de la ville de Lyon.

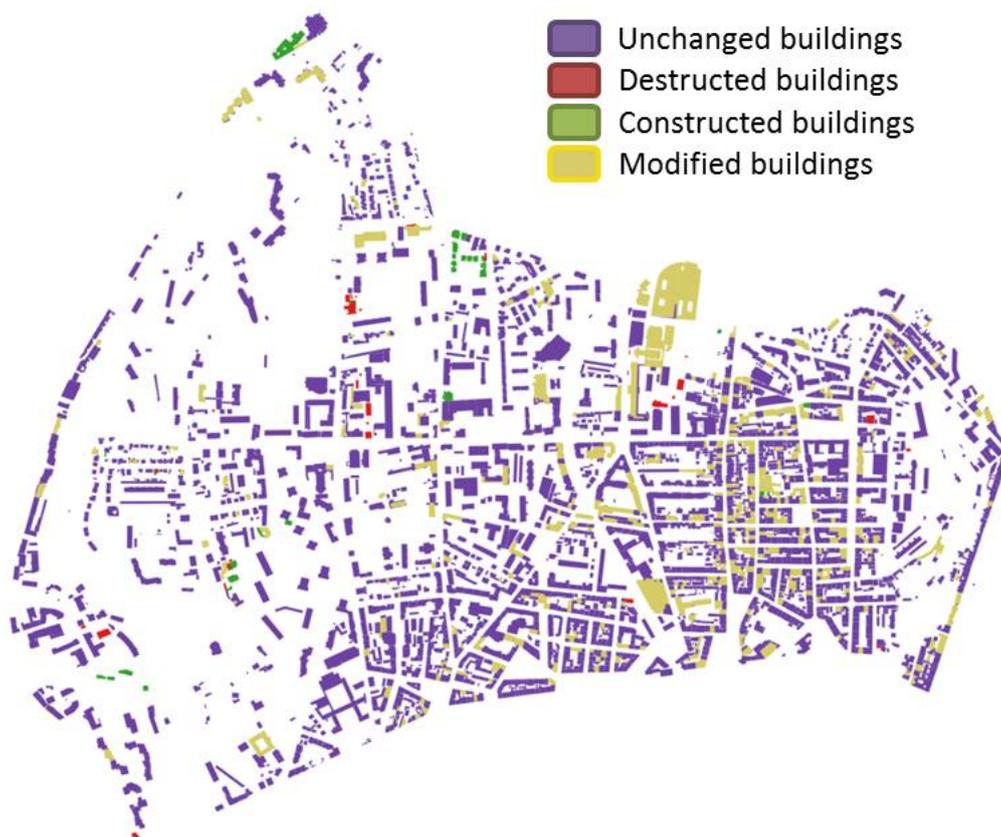


Figure 86: Comparaison des millésimes 2009 et 2012 des bâtiments du 4ème arrondissement de la ville de Lyon découpés par le cadastre.

Tableau 5: Temps de calcul pour les deux zones étudiées.

Zone	Time	Number of building objects	Number of triangles	Surface area	Density of population
Sathonay Camp	40 s	30	40.000	2km ²	2800 people / km ²
Lyon 4	156 s	120	130.000	3km ²	12300 people / km ²
Lyon 4 cut by cadastre	238 s	2800	210.000	3km ²	12300 people / km ²

4.1.2 Comparaison entre un modèle 3D et un nuage de points LiDAR

Puisque les données LiDAR sont plus courantes car plus faciles à générer que les modèles 3D de ville, nous avons également mis en place une méthode comparant les bâtiments d'un modèle 3D avec un nuage de points aérien. Cela permet notamment de pouvoir détecter les zones ayant subies des modifications dans un modèle 3D d'un millésime précédent.

Contrairement à la méthode précédente, nous nous contentons ici de repérer les zones de bâtiment correspondant à des changements entre les deux jeux de données, nous ne cherchons pas à proposer une catégorisation des bâtiments puisque ceux-ci ne sont pas correctement définis dans le nuage de points. Les changements détectés ici peuvent donc correspondre à la catégorie « modifiés » mais également à « détruits/construits ».

La méthode utilisée est illustrée dans la Figure 87. Afin de pouvoir mettre en relation les deux jeux de données, il est nécessaire d'extraire les bâtiments depuis le nuage de points LiDAR.

Nous commençons donc par exploiter une méthode de classification de LiDAR (comme celle présente dans l'outil LAsTools précédemment introduit) afin de détecter les points modélisant des bâtiments. Nous segmentons le nuage de points résultant afin de générer un ensemble de groupements que nous appellerons constructions. Pour chacune de ces constructions, il est alors possible d'en générer une emprise polygonale qui nous permet de la mettre en relation avec les emprises au sol des bâtiments du modèle 3D. Cette mise en relation permet de définir des « couples » de comparaison nous permettant de rechercher les différences en termes de formes des bâtiments, en comparant un maillage 3D à un ensemble de points 3D.

La première étape de la méthode consiste donc à détecter les points correspondant à des bâtiments sur le nuage de points LiDAR afin de pouvoir les comparer au modèle 3D de manière efficace. La classification du nuage de points est réalisée grâce à l'outil LASTools, qui a été présenté dans la section 3.1.2. Le résultat, bien qu'imparfait avec quelques bruits résultants correspondant à des buissons assimilés à tort à des bâtiments, est suffisant pour illustrer le fonctionnement de cette méthode de comparaison. Notons que si des orthophotographies infrarouges sont disponibles sur la zone, elles peuvent être exploitées afin d'améliorer la classification en éliminant les points représentant de la végétation (voir section 3.1.2).

Afin de faire la correspondance avec les bâtiments du modèles 3D représentés par leurs emprises au sol, nous allons chercher à mettre en place de telles emprises au sol à partir des points classés dans la catégorie bâtiments. Nous extrayons de la classification tous les points correspondant à des bâtiments, et nous les segmentons (en liant les points proches) afin d'obtenir un ensemble de nuages de points indépendants les uns des autres. Les points distants de moins d'une certaine valeur (2m dans nos tests) sont groupés en un ensemble de points qui ne sera conservé que si il est suffisamment important, afin d'éliminer les éventuels bruits (au moins 10 points par groupe dans nos tests). La méthode utilisée provient de la librairie PCL, c'est la même que celle introduite dans la section 3.1.2.

Chaque groupement de points ainsi obtenu est censé représenter un bâtiment, ou tout du moins une construction au sens large puisqu'il n'y a ici aucune définition sémantiquement viable de ces objets. Nous appellerons donc un tel groupement une construction : un ensemble de points 3D contenus dans une même emprise au sol.

Nous en extrayons les emprises au sol en utilisant une fermeture morphologique (en utilisant les méthodes de dilatation et d'érosion de la librairie GDAL) permettant de générer une enveloppe polygonale 2D englobant tous les points d'une construction donnée. Nous pouvons alors utiliser ces emprises au sol afin de lier les bâtiments 3D et les constructions présentes dans le LiDAR. Nous calculons ensuite pour chaque point d'une construction donnée sa distance minimale aux polygones de toit du modèle 3D lié en utilisant le calcul de la distance de Hausdorff (voir Annexe 2). Ce calcul est rendu possible grâce à la segmentation du nuage de points et la mise en relation des objets par leurs emprises possibles, qui permettent de limiter les zones à comparer et ainsi avoir des temps de calcul raisonnables.

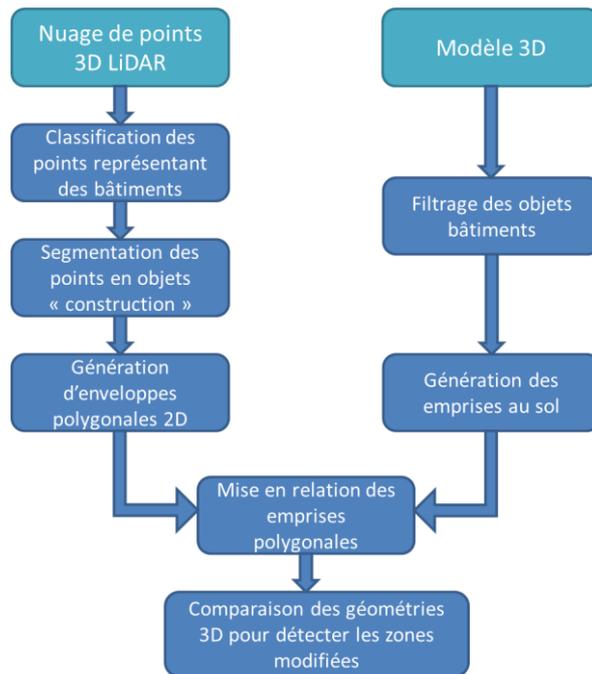


Figure 87: Les étapes de la méthode de comparaison des bâtiments entre un modèle 3D et un nuage de points LiDAR.

Si cette distance est jugée comme suffisamment faible pour que l'on puisse considérer que le point 3D correspond au polygone 3D du toit, nous enregistrons ce point. Pour une construction donnée, cet ensemble de points enregistrés représente les zones qui sont considérées comme équivalentes à la géométrie du modèle 3D. Nous en générons alors une emprise polygonale de la même manière que précédemment.

Si ce polygone représente une part suffisamment importante (γ) de l'emprise du bâtiment 3D, et si les points correspondants représentent également une proportion élevée (également γ) du nuage de points de la construction, alors nous considérons que le bâtiment et la construction sont équivalents et qu'il n'y a donc pas eu de changements. Sinon, nous considérons qu'il y a eu des changements et nous connaissons les zones correspondant à ces modifications (celles qui n'ont pas trouvées d'équivalents dans l'autre jeu de données).

La Figure 88 illustre le résultat complet obtenu sur une tuile de 1km² de la ville de Craponne entre 2012 (modèle 3D) et 2015 (LiDAR), avec une valeur seuil γ de 80% pour considérer qu'un bâtiment est retrouvé inchangé entre les deux modèles. Cette comparaison a été effectuée en 2h20, le modèle 3D contenait 760 bâtiments et le LiDAR était constitué de 7.400.000 points.



Figure 88: Comparaison de bâtiments entre un modèle 3D et un nuage de points LiDAR, sur la zone de Craonne entre 2012 et 2015.

4.1.3 Comparaison entre deux nuages de points LiDAR

La comparaison de deux nuages de points LiDAR est aussi importante, et nous proposons donc ici une telle méthode. La préparation de ces nuages de points est la même que celle précédemment présentée. Nous commençons donc par extraire les points de bâtiments dont nous générons un ensemble d'emprises polygonales.

Pour chaque emprise au sol d'un LiDAR, nous cherchons les emprises au sol de l'autre nuage de points qui correspondent. Une fois cette mise en relation effectuée, nous calculons pour chacun de ses points la distance minimale à l'autre LiDAR. La détection de changement fonctionne de la même manière que précédemment : si une importante proportion des points d'une construction donnée est considérée comme proche de l'autre nuage de points, alors elle est considérée comme « inchangée ». Sinon elle est considérée comme « modifiée ».

La Figure 89 présente les résultats obtenus sur la même zone que précédemment, avec un LiDAR obtenu en 2012 et un autre en 2015. Nous pouvons détecter des différences par rapport à la comparaison avec le modèle 3D de 2012, ceux-ci étant principalement dus à la classification du LiDAR qui ne fonctionne pas parfaitement, notamment avec le jeu de données de 2012 qui est moins dense que celui de 2015. Les résultats ont été générés en 1h20,

le LiDAR 2012 contenant 2.000.000 points alors que le LiDAR 2015 en contient 7.400.000 (la différence provient de la méthode d'acquisition qui a évolué).

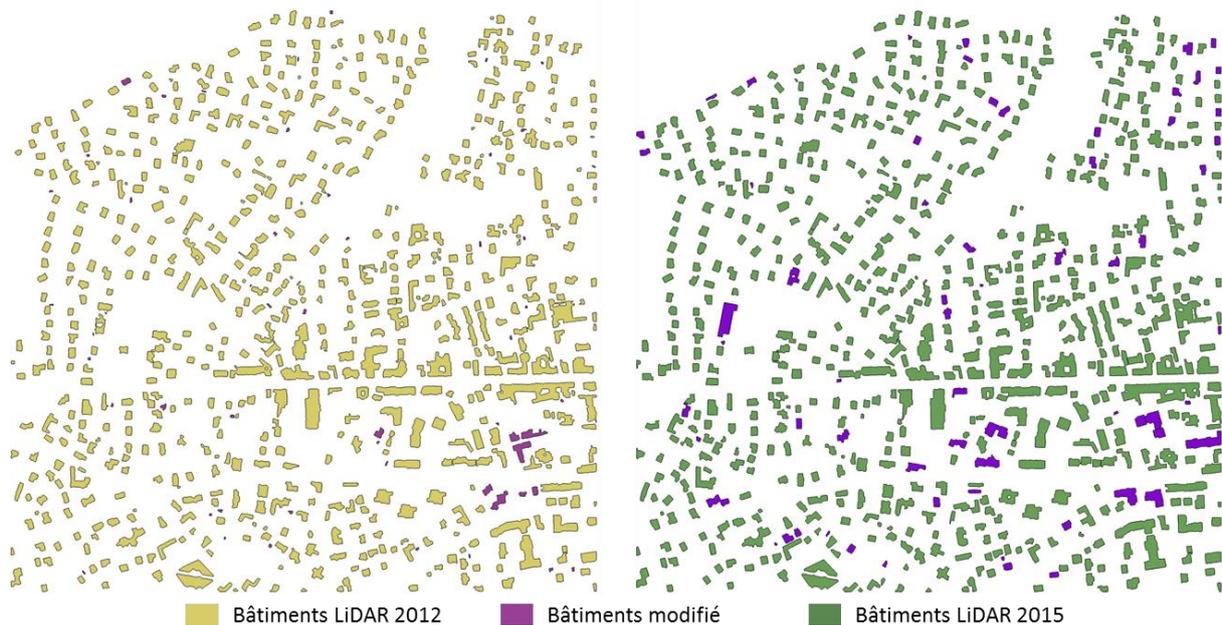


Figure 89: Comparaison de bâtiments entre un modèle 3D et un nuage de points LiDAR, sur la zone de Craponne entre 2012 et 2015.

4.1.4 Synthèse

Nous avons présenté trois méthodes permettant de comparer les bâtiments de modèles virtuels de la ville représentés soit avec des maillages 3D, soit avec des nuages de points 3D. Bien que ces méthodes de comparaison puissent être exploitées dans une logique de validation des jeux de données, le principal intérêt réside dans la possibilité qu'ils offrent de pouvoir mettre en place de manière automatique des modèles temporels de la ville possédant des objets référencés avec plusieurs versions au cours du temps.

Nous avons ainsi pu lier ces travaux à ceux ayant aboutis à la proposition à l'OGC d'une extension au standard CityGML, qui sera directement intégrée dans la future version 3.0 de ce standard, afin d'illustrer leur utilité.

Les comparaisons impliquant des nuages de points dépendent directement de la qualité du processus de classification permettant d'extraire les points représentant des bâtiments. Une erreur de classification dans le jeu de données risque de produire une détection de changements erronée, or les conditions pouvant amener ces erreurs sont nombreuses. Par exemple, il suffit que les deux acquisitions aient été générées à des saisons différentes pour que les nuages de points diffèrent au niveau de la végétation qui peut varier beaucoup en

fonction de la présence ou non de feuillage, or la végétation a un impact important sur la qualité d'extraction des bâtiments dans un nuage de points aérien.

Ces méthodes de comparaisons profiteront donc de la présence de jeux de données externes permettant de faciliter le processus de classification du nuage de points puis l'extraction des zones correspondant à des bâtiments.

Nous avons également démontré que les comparaisons impliquant des modèle 3D bénéficieraient des méthodes d'amélioration de celui-ci, notamment en termes de définition sémantique des objets « bâtiments ». Cela permet une interprétation plus fine des résultats grâce à la possibilité d'identifier isolément les bâtiments et ainsi proposer une analyse pour chacun d'entre eux.

Nous n'avons pas pu quantifier précisément la qualité de nos résultats puisqu'il n'existe pas, à notre connaissance, de jeux de données de référence permettant de quantifier la fiabilité de nos méthodes. Nous nous sommes donc limités à proposer une comparaison avec une détection manuelle qui possède vraisemblablement elle-même un certain nombre d'erreurs et d'incohérences liés en particulier à l'interprétation que peut avoir l'expert.

Nous nous sommes limités ici à comparer les bâtiments du modèle 3D de la ville, modélisés selon le LoD 2 du standard CityGML. Une telle comparaison serait nécessaire sur tous les éléments de la ville, autres que les bâtiments, afin de mettre en place un modèle temporel qui permettra d'enregistrer l'évolution de la ville. Il sera cependant nécessaire de segmenter plus précisément le nuage de points LiDAR afin d'en extraire les différents types d'objets. Nous avons utilisé ici une méthode de segmentation simple mais il en existe des plus efficaces sur lesquelles s'appuient des méthodes de reconstruction 3D, comme celles proposées dans les travaux de [AF14] et [LM12]. Leur utilisation permettrait de mieux extraire les formes des bâtiments et autres éléments de la ville et ainsi proposer des comparaisons plus précises.

Nous pensons ici aussi que chacun des deux types de données utilisées pourrait être exploité afin de mieux modéliser ou interpréter l'autre. Par exemple, le nuage de points permettrait de générer des modélisations plus précises des bâtiments, alors que le modèle 3D faciliterait la segmentation du nuage de points en orientant les recherches de structures artificielles pour la segmentation des points.

4.2 Mesurer l'ambiance du territoire

La planification urbaine nécessite de plus en plus de réaliser des études d'impacts sur des modèles virtuels avant la réalisation de projets afin de quantifier les effets de ceux-ci sur la ville et surtout sur ses habitants. [MK08] ont tenté de référencer les besoins des personnes permettant de définir un paysage urbain assurant leur bien-être, en se basant sur 90 études précédentes menées sur différentes villes à travers le monde. Un grand nombre de ces besoins concernent le paysage extérieur proposé aux habitants. Or, celui-ci est défini par les éléments de la ville qui sont visibles depuis les lieux fréquentés par ceux-ci, et par la manière dont ils le sont.

Cependant, lors de discussions avec des géographes et urbanistes, il est apparu qu'il n'existait pas de méthodes utilisables à grande échelle permettant de mesurer l'impact des objets de la ville (terrains, mais aussi constructions, routes et végétation), et notamment de futurs projets d'urbanisation. L'impact d'un projet amenant par exemple à la construction d'une nouvelle tour est rarement mesuré, ou alors sur une petite échelle.

Des praticiens travaillant à Londres nous ont ainsi expliqué que, malgré toutes les analyses de visibilité réalisées pour la présentation et la discussion du projet de tour "Shard", sa visibilité depuis plusieurs districts et leurs espaces publics n'avait pas été anticipée, faute d'analyses assez précises. En conséquence, certains conseils de district n'ont pas été saisis pour discuter du projet et les conseillers et les habitants de ces quartiers ont découvert l'impact du Shard sur leur paysage quotidien une fois le bâtiment construit, ce qui a suscité à la fois du mécontentement et de la méfiance vis-à-vis des processus de consultation. Dans le cas d'immeuble de grande hauteur comme le Shard, dont l'aspect iconique est mis en avant par ses promoteurs, le manque de précision de l'analyse de visibilité peut donc conduire à des erreurs de gouvernance (non-consultation préalable de personnes qui sont pourtant concernées par un projet) qui peuvent impacter négativement les relations entre les gouvernements locaux et les habitants. L'analyse de la visibilité d'un projet de tour est également un des cas d'usage cité par les praticiens lyonnais. Cette analyse peut être notamment utile au moment de l'étude d'impact d'un projet déjà conçu, afin d'avoir un diagnostic le plus précis possible de son insertion paysagère, y compris concernant des points de vues ou des lieux de vies éloignés du projet.

Il est donc nécessaire de mettre en place des nouvelles méthodes permettant de quantifier l'impact qu'a un élément de la ville, qu'il soit déjà existant ou en projet, sur le territoire

(pouvant s'étendre sur de très grandes distances, comme dans le cas de tours ou d'éléments sur des collines par exemple).

Bien que ces impacts puissent être mesurés de nombreuses façons (en termes de bruit ou de flux de personnes par exemple), nous avons décidé de nous intéresser à mesurer l'impact de ces objets de la ville sur le territoire. Nous proposons ici deux approches : la première concerne la qualification du champ vision, qui participe directement à cette notion d'ambiance urbaine, aussi bien depuis l'élément urbain étudié que depuis les zones depuis lesquelles il est visible. La seconde concerne l'ensoleillement et surtout l'ombre apportée par ce projet qui ont également une influence sur l'ambiance du territoire environnant.

Nous proposons donc deux méthodes permettant de mesurer la composition visuelle d'un point de vue donnée en détectant les objets urbains de la ville qui se trouvent dans le champ vision, puis de mesurer l'impact en termes d'ombres de ces objets.

Ces méthodes permettent donc de mesurer l'impact d'éléments prévisionnels, afin notamment de fournir des indicateurs pouvant être utilisés dans le but de comparer différentes versions du territoire, ou pour fournir une mesure qualitative sur le modèle existant de la ville. Elles peuvent ainsi être utilisées afin de qualifier l'ambiance de points de vue précis : pour déterminer les points de vue proposant les plus beaux paysages de la ville ou pour qualifier la vue accessible depuis les différentes fenêtres d'un immeuble par exemple.

Au-delà de l'aspect visuel, ces indicateurs peuvent également être mis en relation avec des jeux de données externes permettant par exemple à des géographes de proposer des qualifications différentes du territoire. Selon les applications désirées, il peut ainsi être utile de pouvoir lier la liste des éléments de la ville visibles depuis un objet donné (ou ombragés par celui-ci), obtenue par notre méthode d'analyse, avec des informations socio-économiques permettant de qualifier autrement le territoire concerné. Par exemple, il peut être important de savoir que le point de vue est principalement visible depuis des bâtiments contenant des bureaux d'entreprises, depuis des zones d'habitation ou depuis des lieux publics tels que des centres commerciaux. De même pour la mesure d'ensoleillement qui n'aura pas la même signification en fonction de la zone concernée : il sera peut-être plus dommageable pour un projet d'immeuble d'ombrager des quartiers résidentiels plutôt qu'un entrepôt par exemple.

Nos méthodes fournissent donc un ensemble de résultats pouvant être exploités par ces géographes, mais le travail présenté dans cette thèse se limite à la mise en place de ces méthodes. Nous fournirons donc quelques exemples d'applications envisageables grâce aux

résultats générés mais nous n'avons pas ici pour objectif de fournir des analyses précises et pertinentes comme le feraient les géographes qui utiliseront nos méthodes.

Pour le développement de ces méthodes, nous avons travaillé en collaboration avec des géographes de l'EIVP⁵⁸ et de l'UMR 5600 : Environnement, Ville, Société⁵⁹.

4.2.1 Mesurer la composition visuelle d'un paysage urbain

Cette section reprend des éléments d'un article en cours de rédaction :

Pedrinis, F., Jacquinet, F., Appert, M. & Gesquière, G. "Composition of 3D cities".

Nous désirons analyser le champ de vision d'un point de vue défini par l'utilisateur en détectant les objets de la ville qui s'y trouvent, afin de pouvoir proposer de multiples indicateurs permettant de caractériser et interpréter la vue selon les besoins de cet utilisateur. Comme nous l'avons vu dans la section 2.2.2, des indicateurs existent déjà afin de qualifier un paysage urbain mais ceux-ci se basent essentiellement sur des modèles 2D et ne gèrent que des territoires peu étendus réduisant ainsi la pertinence des analyses au seul voisinage proche. Quant aux résultats proposés, ils se limitent souvent à l'aspect géométrique du champ de vision et ne permettent pas d'interroger plus en détail sa composition.

Des études ont également été menées sur l'analyse de la composition d'un territoire urbain, comme dans les travaux de [LW02] et [LW04]. Ceux-ci s'intéressent à l'occupation du sol du territoire étudié via des données 2D, en analysant les éléments qui s'y trouvent et la surface qu'ils occupent. Cependant, ces analyses ne permettent pas de répondre à notre problématique consistant à pouvoir analyser le territoire urbain, pas forcément dans sa globalité qui reste abstraite aux yeux d'un habitant, mais depuis des points de vue accessibles à celui-ci.

Nous proposons donc d'exploiter le modèle 3D de la ville afin de détecter tous les objets urbains qui sont visibles depuis un point de vue donné, pas seulement pour proposer une image ou une représentation géométrique du champ de vision correspondant, mais aussi pour lister tous les éléments visibles et leurs caractéristiques (géométriques et sémantiques) définies dans le modèle urbain.

⁵⁸ <http://www.eivp-paris.fr/>

⁵⁹ <http://umr5600.cnrs.fr/fr/accueil/>

La liste des différents objets détectés comme visibles peut ainsi être utilisée directement (par exemple pour caractériser une vue selon la proportion de végétation et de bâtiments qui s'y trouvent, ou pour vérifier qu'un monument donné est bien vu depuis un emplacement donné), ou peut être interprétée à travers des analyses spatiales plus poussées (par exemple pour déterminer la zone depuis laquelle un monument donné est vu, et mettre en relation le résultat avec des données socio-économiques décrivant ce territoire afin d'en trouver toutes les places publiques). Ces indicateurs doivent donc pouvoir permettre l'implication de jeux de données externes qui viendront les compléter et ainsi permettre de répondre à besoins spécifiques. Cette méthode est une analyse d'intervisibilité : n'importe quel élément de la ville détecté comme visible par un observateur indique que celui-ci peut également être vu depuis cet élément. Cela signifie que les études peuvent concerner la vue dans le modèle virtuel de la ville depuis l'objet où se situe l'observateur, mais également la perception de cet élément par la ville entière.

La Figure 90 représente par exemple le point de vue capturé depuis le musée des Confluences⁶⁰ situé au sud de la ville de Lyon. Ce point de vue est réputé pour proposer un beau paysage de la ville de Lyon. Nous y apercevons notamment le fleuve Rhône, la colline de Fourvière avec de la végétation et surtout sa Basilique, ainsi que les tours importantes de la ville. Cependant, en analysant ce paysage, nous pouvons également constater qu'il est occupé par une surface importante de routes qui occupent une place centrale, ainsi que de chemins de fer qui sont cependant légèrement en dehors du champ de cette photographie.

Ce constat illustre le fait qu'il est nécessaire de s'intéresser à détecter tous les objets visibles, en ayant le maximum d'informations possibles sur ceux-ci afin de pouvoir qualifier la vue en fonction des besoins. En fonction de ceux-ci, il pourra ainsi être possible de qualifier la vue depuis ce musée comme étant de bonne qualité si les critères consistent seulement à pouvoir voir les éléments importants du territoire, mais cette qualification sera plus nuancée si les critères prennent en compte le fait que la présence de routes ou de chemins de fer nuisent à la qualité d'un paysage.

⁶⁰ <http://www.museedesconfluences.fr/>



Figure 90: Point de vue depuis le musée des Confluences.

C'est pour permettre de générer ce type d'analyse que nous avons mis en place une méthode permettant de typer le terrain grâce à des données extérieures (que nous présentons dans l'annexe 3). Au lieu d'avoir un terrain uniforme en termes de sémantique (et visuel) composé de triangles définissant le « terrain », nous pouvons ainsi exploiter des données décrivant l'occupation des sols afin de proposer un typage du terrain selon celles-ci. Nous pouvons ainsi avoir un terrain composé de triangles sémantiquement définis comme représentant des routes, de la pelouse, de la terre, etc. Plus le modèle en entrée est précis, plus l'analyse sera pertinente puisqu'il sera possible de mesurer précisément la composition de la vue en ayant le maximum d'éléments qui s'y trouvent dans la réalité.

L'analyse visuelle est donc réalisée sur un modèle urbain 3D pouvant être composé de plusieurs types d'objets (bâtiments, terrains, végétation, etc.). Chaque modèle étudié peut proposer une composition différente : certains peuvent être uniquement composés du terrain et des bâtiments alors que d'autres peuvent avoir une modélisation plus complète de la ville (avec les ponts, les mobiliers urbains, etc.).

Cette méthode est représentée dans la Figure 91 qui présente les différentes étapes nécessaires à sa mise en place.

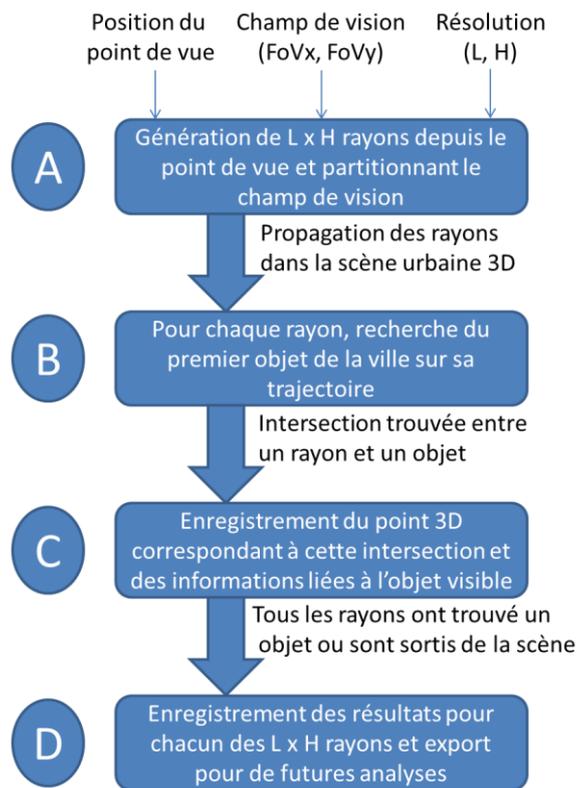


Figure 91: Etapes de la méthode permettant de mesurer la composition visuelle d'un modèle urbain.

La première étape de notre méthode consiste à définir un point de vue dans l'espace 3D contenant le modèle urbain, depuis lequel des rayons vont être générés (étape A). Ces rayons partitionnent le champ de vision et vont se propager dans le modèle 3D jusqu'à trouver d'éventuelles intersections avec des éléments de la ville (étape B), ce qui signifiera que les objets concernés sont visibles depuis le point de vue, et réciproquement (étape C). Grâce à cet ensemble de rayons, nous aurons ainsi la liste des éléments visibles depuis le point de vue étudié (étape D), et nous pourrons alors en déduire des indicateurs en fonction du type de ces objets ou des informations qui leur sont liées.

Les paramètres en entrée permettent de représenter le point de vue et le champ de vision étudié. Il est nécessaire de définir la position 3D de ce point de vue et l'ouverture angulaire du champ de vision, ou Field of View (FoV), qui peut aussi bien correspondre à celui d'un humain (200 degrés (FoVx) x 135 degrés (FoVy) selon [WT97]) pour étudier par exemple la vue proposée depuis la fenêtre d'une habitation, qu'à un champ panoramique complet sur 360 x 180 degrés, pour mesurer par exemple la superficie du territoire depuis lequel le sommet d'une tour est visible. Afin de partitionner le champ de vision par un ensemble de rayons, il est également nécessaire de définir une résolution (L x H) qui représente le nombre de rayons à générer.

Nous avons choisi cette solution de partitionner le champ de vision car chercher à établir la liste complète des objets se trouvant dans l'espace 3D correspondant au champ de vision, signifierait un nombre beaucoup trop élevé de rayons à lancer. Les modèles 3D des villes peuvent maintenant s'étendre sur plusieurs centaines de km², ce qui peut représenter un nombre très important d'objets et de polygones à tester. Comme nous l'avons vu précédemment (Tableau 3), une tuile de 1km² peut contenir plusieurs centaines de milliers de triangles. Chercher à obtenir un résultat exhaustif reviendrait donc à générer des rayons pour chacun de ces polygones et à effectuer des tests d'intersection entre eux et tous les objets se trouvant potentiellement sur la même trajectoire afin de ne conserver que ce qui n'est pas caché depuis le point de vue étudié. Cela s'avèrerait très coûteux en termes de temps de calcul et une telle précision n'est pas recherchée ici. En effet, l'objectif de notre méthode consiste à quantifier le champ de vision d'un point de vue donné pour des êtres humains se trouvant à cette position. Cela signifie qu'un objet perd de son importance dans la composition de la vue s'il s'éloigne de la scène par rapport au point de vue, et qu'à partir d'une certaine distance il n'est plus distinguable par un œil humain.

Ce constat est renforcé par la notion d'acuité visuelle qui dépend de la distance à l'objet visualisé. La résolution angulaire moyenne d'un œil humain est comprise entre 0.02 et 0.03 degrés selon [Rig65], ce qui équivaut à dire qu'il est capable de distinguer en moyenne des objets de 40 cm de diamètre jusqu'à 1km de distance.

Nous avons donc décidé de segmenter cet espace 3D en partitionnant angulairement l'espace se trouvant dans le point de vue. La première étape de notre méthode consiste ainsi à discrétiser le champ de vision afin de maîtriser le nombre de rayons à lancer. En fonction des paramètres de champ de vue, ou Field of View (FoV), et de résolutions choisies, un nombre déterminé de rayons vont ainsi être générés depuis l'origine afin de remplir efficacement l'espace 3D se trouvant devant le point de vue (voir Figure 92). Les paramètres de FoV sont définis selon les besoins de l'utilisateur et il est par exemple possible de calculer une analyse panoramique en choisissant un FoV_x de 360°. Deux rayons voisins sont séparés angulairement de $\Delta\text{FoV}_x (= \text{FoV}_x / L)$ ou $\Delta\text{FoV}_y (= \text{FoV}_y / H)$. Augmenter la résolution L ou H (donc le nombre de rayons) permettra d'obtenir des résultats plus fins, plus précis, et donc plus pertinents à interpréter, mais augmentera en contrepartie les temps de calculs.

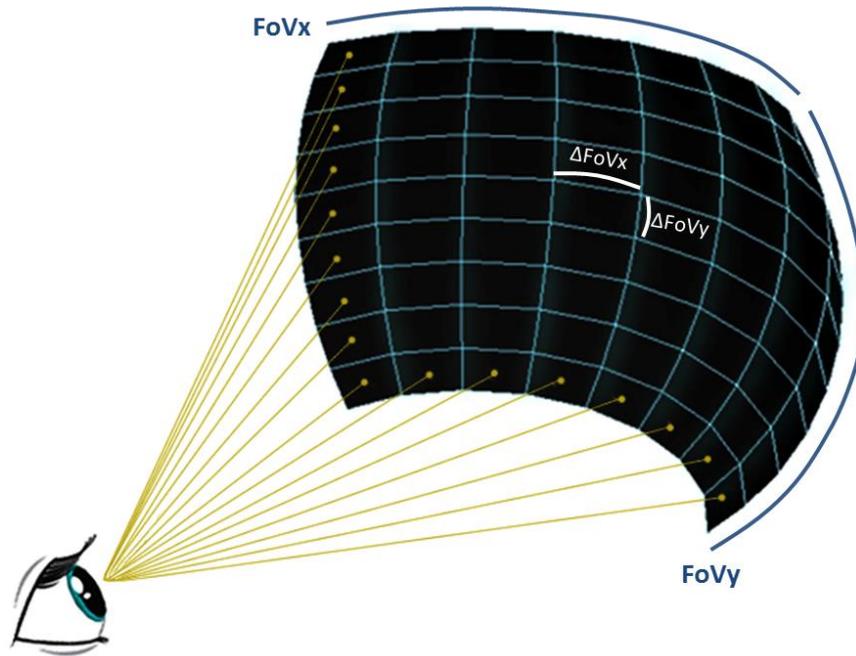


Figure 92: Discrétisation de l'espace 3D selon des rayons générés depuis le point de vue étudié.

La détection des objets qui se trouvent dans ce champ de vision se fait donc via la propagation de rayons émis rectilignement depuis le point de vue à la recherche d'objets se trouvant dans leur trajectoire, simulant ainsi la trajectoire des photons qui font le trajet inverse dans le cadre de la vision humaine. La technique de lancer de rayon est notamment très répandue dans les travaux de rendu en synthèse d'image. De nombreux travaux existants détaillent des méthodes permettant de faciliter, améliorer et accélérer le rendu de scènes complexes. Nous pouvons notamment citer les travaux de [Gla89], [KK86], [KVH84] et [Lev90].

La méthode employée est similaire au fonctionnement d'un algorithme de rendu, mais alors que celui-ci viendrait uniquement remplir chaque pixel de la grille illustrée Figure 92 avec une valeur RVB de couleur correspondant à l'objet intersecté, nous allons ici pouvoir stocker plus d'informations. Il est toujours possible d'obtenir une valeur purement visuelle en lisant par exemple la texture ou la couleur de l'objet intersecté, mais nous nous intéressons ici surtout à la sémantique associée à cet objet et à sa composition. La Figure 93 illustre un exemple simple avec 3 rayons intersectant chacun un objet de type différent. Les rayons ne trouvant pas d'intersection avec les objets du modèle urbain avant de sortir du territoire étudié sont considérés comme étant directement orienté vers le ciel et sont stockés en tant que tels. Un rayon finit donc obligatoirement avec au moins une information qui lui est associée : soit l'élément de la ville qu'il a intersecté et les éventuelles données sémantiques qui lui sont liées, soit l'information que ce rayon est dirigé vers le ciel.

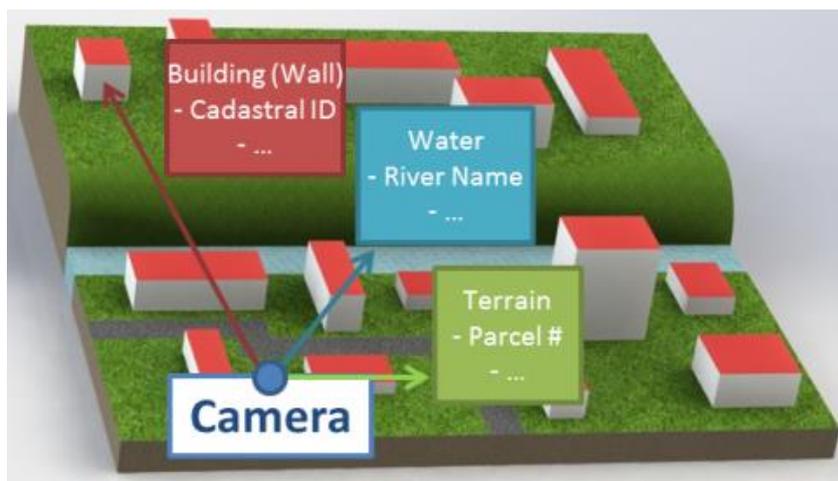


Figure 93: 3 rayons générés depuis la caméra intersectent 3 objets de types différents. Le rayon rouge intersecte un bâtiment et stocke les informations sémantiques associées, tandis que le bleu et le vert trouvent respectivement de l'eau et du terrain.

La méthode produit en sortie une base de données de points 3D géoréférencés correspond à l'intersection de chaque rayon avec un élément du modèle urbain. Chaque point possède un lien vers cet objet, ce qui permet de connaître la liste de tous les éléments de la ville qui sont visibles depuis le point de vue étudié. Nous pouvons également accéder aux différentes informations sémantiques stockées dans le modèle concerné (date de construction du bâtiment, l'essence d'un végétal, le nombre de voies d'une route, etc.) ainsi que les éventuelles données externes liées à son identifiant (les informations liées à l'identifiant cadastral d'un bâtiment, les données de trafic liées aux rues, etc.). La position 3D géoréférencée correspondant à l'objet vu depuis le point d'origine de l'analyse permet également de pouvoir récupérer n'importe quelle information contenue dans d'autres jeux de données géospatiales représentant la ville. Il est ainsi possible de caractériser une vue en fonction des objets qui s'y trouvent et des informations contenues dans une base de données externe (exemple : fonctions des bâtiments, trafic routier, etc.).

A partir de cet ensemble de données, il est par exemple possible de générer une image de la vue correspondant à la position de l'observateur choisie en projetant le champ de vision sur un plan 2D et en assignant une couleur à chaque pixel selon le type d'objet. Il est aussi possible d'interroger les résultats pour savoir si un objet précis est visible depuis le point de vue testé. A l'inverse, cela peut également fournir la liste de toutes les zones/objets de la ville depuis lesquelles un objet/bâtiment/lieu remarquable est visible en générant une analyse dont le point de vue sera placé à sa position.

Une autre application concerne les analyses de la composition de la vue, pour déterminer par exemple la proportion de végétation ou de construction artificielles dans le champ de vision.

En effet, les différents éléments composant le modèle urbain ont des impacts visuels différents les uns des autres et une application immédiate d'une étude de visibilité consiste ainsi à analyser les éléments qui la composent. Deux points de vue n'auront par exemple pas le même intérêt pour un observateur si la visibilité de l'un est essentiellement composée de bâtiments et de routes alors que de la végétation et une rivière embellissent le second. Un exemple d'une telle analyse de composition est illustré à droite de la Figure 94 et correspond au point de vue représenté à gauche.

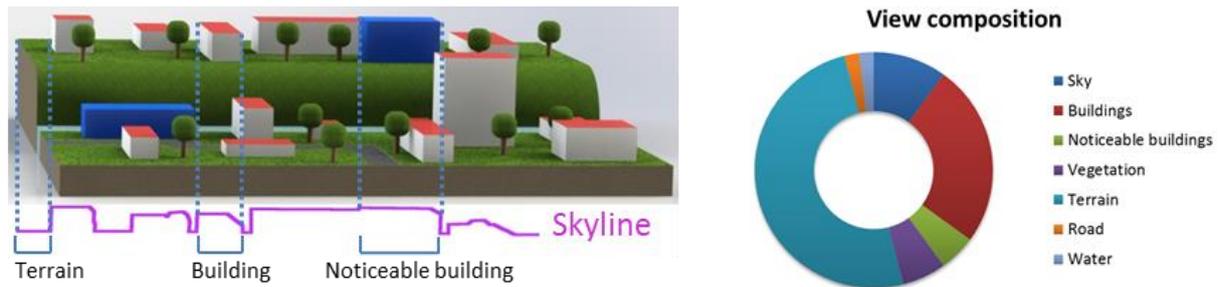


Figure 94: A gauche : point de vue utilisé pour une analyse de visibilité. 6 différents types d'objets sont présents : bâtiments, bâtiments remarquables (en bleu), eau, routes, terrain et végétation. A droite : analyse de composition de la vue correspondante.

Les résultats fournis par la méthode permettent également d'extraire facilement des paramètres liés à l'occupation du ciel dans la vue, tels que le skyline 3D délimitant la frontière entre le ciel et les éléments de la ville étudiée (Figure 94, en bas à gauche, en violet) ou le Sky-View Factor, qui caractérise un point de vue en fonction de l'occupation du ciel dans son champ de vision ([WJ87], [BGR01]).

Le skyline d'une ville est une représentation unique de son identité : il décrit l'emprise créée par la ville sur le ciel. Le skyline est généré en prenant pour chaque colonne de rayons le dernier point intersectant un objet urbain avant le ciel. Le skyline généré par notre méthode est une succession de points 3D définissant précisément la ligne d'horizon depuis le point de vue étudié. Les informations sémantiques contenues dans ces points permettent également de caractériser le skyline et donc de savoir par exemple si celui-ci est essentiellement formé par des bâtiments, de la végétation ou du terrain lointain. La Figure 95 propose une représentation en vue de dessus du skyline de la Figure 94, ainsi que sa composition. Au-delà de la forme même du skyline qui constitue une représentation caractéristique de la ville, il est ainsi possible de s'intéresser à sa composition ainsi qu'aux objets urbains qui le façonnent.

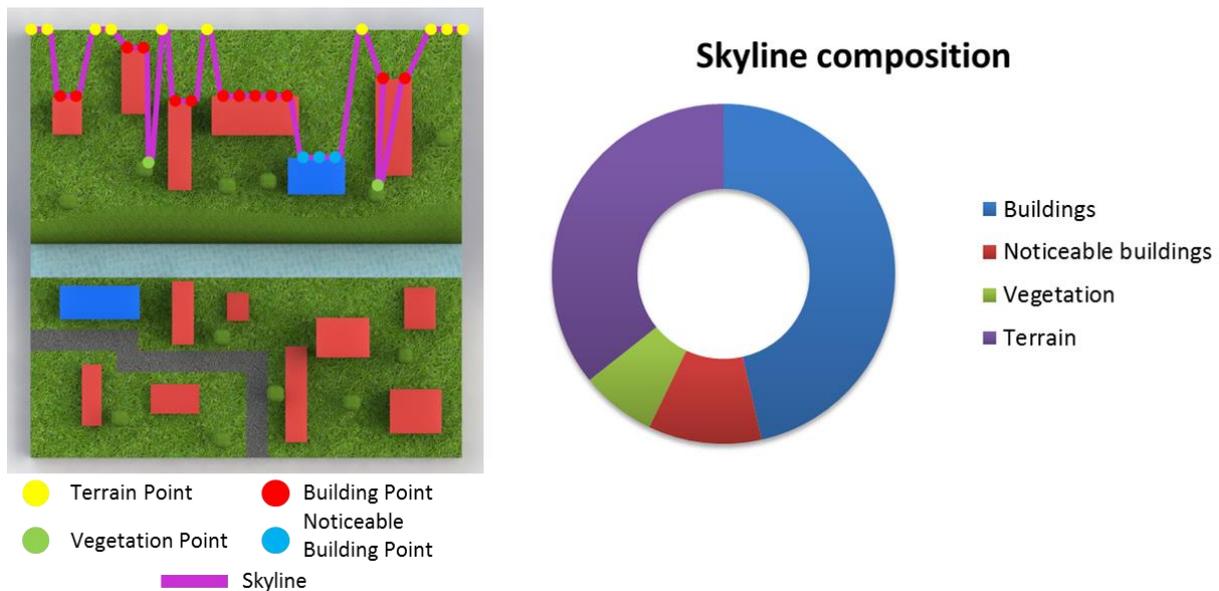


Figure 95: A gauche : vue du dessus du skyline 3D généré dans la Figure 94. A droite : composition de ce skyline en fonction des types d'éléments qui l'ont façonné.

Tous les indicateurs pouvant être générés à partir de notre méthode permettent de qualifier un champ de vision de la ville à un instant donné : celui représenté par le modèle virtuel de la ville. Cependant, grâce au développement de modèles permettant de gérer des versions concurrentes et des modèles temporels [CSG+17], ces indicateurs peuvent également permettre de mesurer l'impact d'un projet d'urbanisme et ainsi proposer une nouvelle façon de comparer différents projets concurrents. Il faudrait alors générer une analyse avant et après ces différents projets afin de pouvoir mesurer et comparer leur impact. Par exemple, il sera ainsi possible de quantifier l'impact d'une nouvelle tour sur la qualité de la vue depuis les belvédères caractéristiques de la ville, et ainsi pouvoir choisir le projet de tour en ayant le moins.

L'utilisation de cette méthode nécessite cependant une organisation efficace du territoire étudié puisque le chargement du modèle urbain entier peut s'avérer problématique en termes de coût mémoire. C'est une problématique traditionnelle pour les outils se basant sur le lancer de rayon, comme dans les travaux de [KK86] qui proposent une méthode permettant de gérer des scènes complexes. Ces méthodes reposent généralement sur l'utilisation de boîtes englobantes et sur une hiérarchie des objets composant la scène 3D. Nous avons donc également exploité ces solutions, en nous basant cependant sur les hiérarchies présentées précédemment qui exploitent les caractéristiques des modèles virtuels de la ville plutôt que

d'utiliser une hiérarchie inspirée des travaux traditionnels de rendu qui sont développés pour des scènes 3D ne contenant pas de sémantique.

Nous avons donc décidé ici d'utiliser la structure en tuiles régulières afin de pouvoir traiter des territoires arbitrairement vastes. Ce tuilage permet de charger seulement les tuiles nécessaires afin de maîtriser le coût mémoire du traitement et de pouvoir ainsi traiter entièrement un modèle 3D, indépendamment de son étendue. Nous utilisons ici le tuilage découpant les géométries car nous aurons besoin de pouvoir trier les tuiles selon leur distance au point de vue afin d'accélérer la propagation des rayons.

Chacune des tuiles ainsi créée contient un ensemble d'objets urbains et leurs géométries 3D associées. Il est cependant nécessaire de limiter le chargement / déchargement de ceux-ci afin d'optimiser le traitement : charger puis décharger les géométries 3D pour chaque rayon représenterait une perte de temps considérable. Nous désirons plutôt regrouper tous les rayons pouvant intersecter une tuile donnée afin de n'avoir à la charger, réaliser les tests d'intersection entre ses géométries et ses rayons, puis la décharger une unique fois.

Afin d'attribuer les rayons à chaque tuile sans avoir à la charger en mémoire, nous travaillons dans un premier temps sur les boîtes englobantes des tuiles, que nous notons ici AABB (Axis-Aligned minimum Bounding Box). Une AABB représente la boîte la plus petite possible permettant de contenir entièrement tous les objets d'une tuile du city model. Elle correspond à l'emprise au sol carrée de la tuile extrudée selon les valeurs d'altitudes minimales et maximales des objets de la ville qui s'y trouvent. Une AABB a été précalculée pour chacune des tuiles.

En mettant en place une structure en quadtree définissant une hiérarchie de AABB imbriquées, nous pouvons également accélérer le parcours de toutes les tuiles du modèle 3D afin de leur assigner la liste des rayons qui intersectent leurs boîtes englobantes (un rayon peut être assigné à plusieurs tuiles). Cette organisation permet de facilement repérer les ensembles de tuiles ne se trouvant pas dans le champ de vision puisque ne contenant aucun rayon, et ainsi pouvoir les écarter rapidement sans avoir eu besoin de les charger en mémoire et d'effectuer des calculs d'intersection inutiles. La structure en quadtree mise en place afin de couvrir efficacement le territoire potentiellement très étendu sur lequel l'étude est lancée est illustrée Figure 96. Les AABB précédemment calculées (en bleu) sont regroupées 4 par 4 afin de former une nouvelle boîte englobante les contenant (en orange). Ces boîtes sont à leur tour regroupées 4 par 4 afin de créer une nouvelle hiérarchie de AABB (en vert), et cette opération est répétée plusieurs fois afin d'obtenir une hiérarchie de boîtes englobantes dont le niveau le

plus haut dépendra de la surface couverte par city model étudié. L'intérêt de cette hiérarchie consiste donc à simplifier le processus de calcul d'intersections entre le modèle 3D et les rayons en orientant rapidement ces derniers vers les tuiles qu'ils ont une chance d'intersecter. Pour une AABB donnée, seuls les rayons l'ayant intersectée iront ensuite tester ses 4 boîtes enfants.

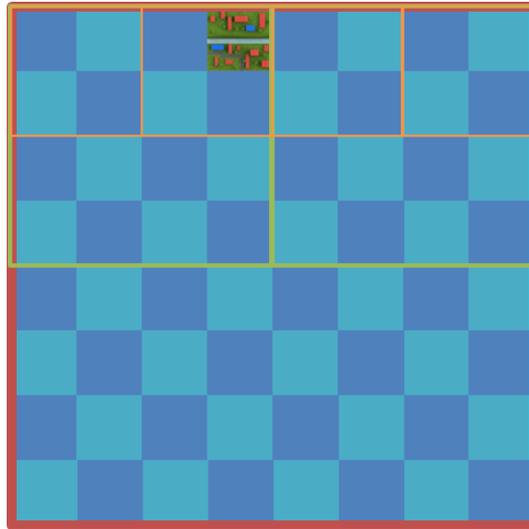


Figure 96: Hiérarchie de boîtes englobantes pour un modèle tuilé utilisant une structure en quadtree.

Après avoir assigné aux tuiles du modèle urbain tous les rayons générés depuis le point de vue de l'observateur, nous trions les tuiles possédant une liste de rayons non vide selon leurs distances à la position de l'observateur. Ceci permet de définir l'ordre dans lequel les tuiles sont traitées. Pour un rayon donné, il est effectivement plus efficace de commencer par tester les objets les plus proches de son origine puisque s'il en intersecte un dans une tuile, cela signifie qu'il est inutile de tester toutes les tuiles suivantes dont tous les autres objets détectés par ce rayon seraient cachés par celui correspondant à cette première intersection. A l'inverse, si nous testions une tuile donnée sans avoir vérifié celles se trouvant plus proches de la caméra, trouver une intersection avec un de ses éléments ne sera pas suffisant puisqu'il faudra contrôler que le rayon n'est pas préalablement intersecté par un objet plus proche. Cela produirait donc un ensemble de calculs potentiellement inutiles qui sont évités grâce à la structure mise en place.

Chaque tuile est ainsi traitée l'une après l'autre selon l'ordre établi. Ce traitement consiste à charger ses éléments et les géométries 3D associées pour détecter d'éventuelles intersection entre eux et la liste de rayons ayant intersecté la boîte englobante de la tuile. Lorsqu'un rayon intersecte un objet, les informations de cet objet lui sont assignés puis il est retiré de toutes les autres tuiles dans lesquelles il était en attente.

Après avoir parcouru toutes les tuiles contenant au moins un rayon qui intersectait leur AABB, les rayons restants n'ayant trouvé aucune intersection sont alors considérés comme étant orientés vers le ciel.

Nous avons décidé d'illustrer les résultats pouvant être obtenus avec cette méthode en nous plaçant depuis un point de vue célèbre de la ville de Lyon : une petite esplanade située juste à côté de la Basilique de Fourvière qui propose une vue dégagée sur une grande partie du territoire lyonnais. Nous avons cependant incorporé dans ce territoire deux nouvelles tours imaginaires, qui correspondent aux tours de Londres The Shard et The Gherkin (ou 30 St Mary Axe). Elles ont été modélisées en 3D par un infographiste et nous les avons insérées dans une version alternative du modèle de la Métropole de Lyon. Nous allons pouvoir mesurer l'impact de ces tours imaginaires sur la vue proposée depuis ce point de vue, en sachant qu'elles ont été positionnées à approximativement 2km de celui-ci. Nous rappelons que les études proposées ici ont été réalisées pour illustrer les possibilités offertes par notre méthode. Celle-ci est actuellement utilisée par des géographes mais nous ne pouvons pas communiquer ici autour de leurs résultats qui n'ont pas encore été finalisées.

Une fois la position et l'orientation du point de vue choisis, le champ de vision a été défini avec un FoVx de 140° , et un FoVy de 60° . Nous avons choisi une résolution de 1400×600 , soit 840.000 rayons qui sont propagés sur le territoire entier de la Métropole de Lyon (environ 550km^2). Cela représente une résolution angulaire de 0.1 degré (nous rappelons que la résolution moyenne de l'œil humain est comprise entre 0.02 et 0.03 degré). Il a fallu 5 heures pour générer chacune de ces analyses : nous n'avons pas encore proposé dans cette méthode une gestion intelligente des versions de la ville qui consisterait à ne relancer que les rayons pouvant être impacté par les modifications.

Les points d'intersection trouvés sont répartis sur une surface de plus de 250km^2 (ce qui signifie que la moitié des tuiles du modèle complet ont dû être chargées), et que le point le plus lointain a été trouvé à presque 20km du point de vue étudié. La Figure 97 est une représentation en image du point de vue généré pour les deux versions du modèle.

Pour générer ces images, qui représentent une interprétation visuelle des résultats, nous avons assigné une couleur pour chaque rayon en fonction du type d'objet intersecté (vert pour de la végétation, marron pour le terrain, beige pour les murs de bâtiments et rouge pour les toits de bâtiments). Les dimensions de l'image générée correspondent donc à la résolution de

l'analyse (un rayon = un pixel). La Figure 98 propose un zoom sur la zone impactée par les tours.

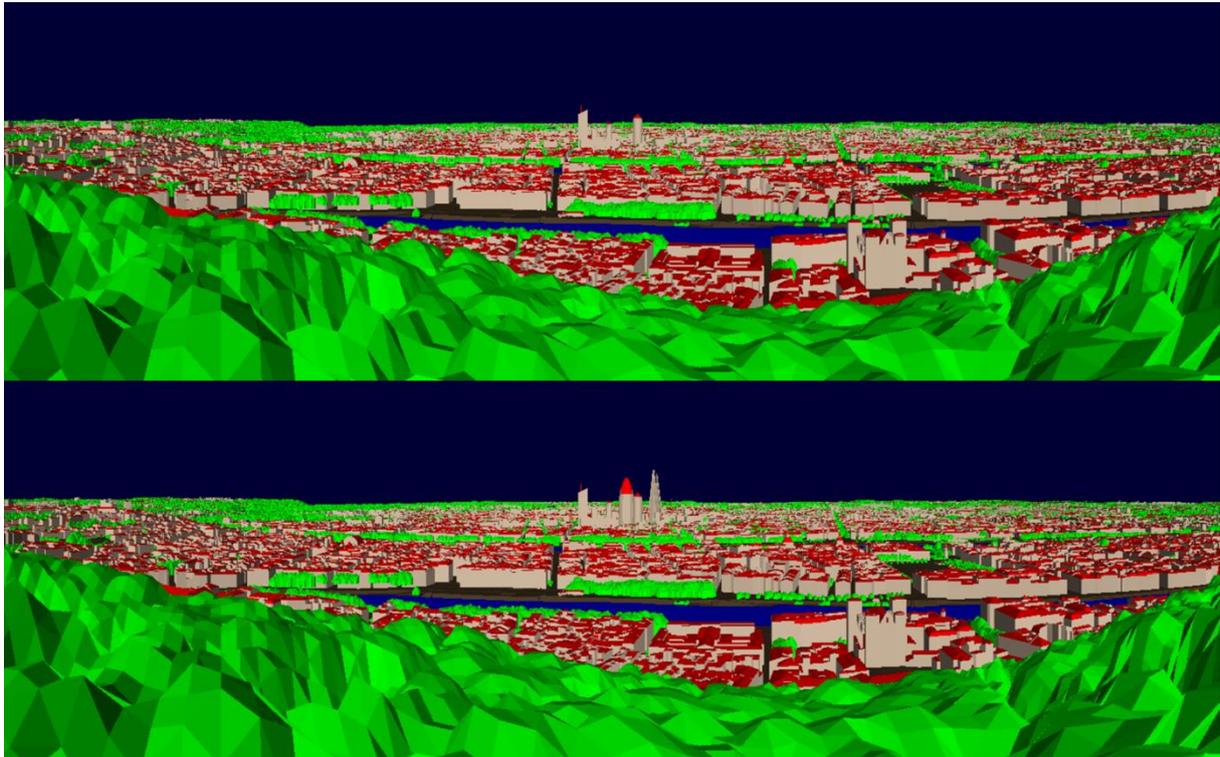


Figure 97: Analyses de visibilité sans (à gauche) et avec (à droite) des projets de tours imaginaires.

La Figure 99 propose une autre représentation des résultats de ces deux analyses : les points d'intersection correspondant aux objets visibles depuis le point de vue sont visualisés ici selon leur position 2D. Nous avons superposé à ce résultat une empreinte (approximative) des territoires couverts par le modèle 3D de la Métropole de Lyon. Ce sont les frontières théoriques des communes, mais les modèles 3D ne sont pas exactement découpés selon celles-ci. Nous pouvons constater que l'analyse n'est probablement pas complète puisque des points se situent aux frontières de ce territoire, et il en existerait probablement d'autres au-delà de celles-ci. Cependant, cela représente des zones lointaines du point de vue étudié, et nous pouvons donc considérer que la partie la plus importante de l'analyse est déjà présente.

Les points beiges correspondent à l'analyse effectuée sur la version avec les tours imaginaires : chaque point correspond ici à une intersection entre un rayon et un objet de la ville. L'analyse de la version sans ces tours est identique, sauf pour le corridor de points verts correspondants aux zones cachées par les deux tours ajoutées. Du point de vue étudié, il est probable que la perte de ces zones n'ait pas une grande importance. Cependant, cela signifie que les éléments correspondants ont perdu la vue sur la Basilique de Fourvière, ce qui peut s'avérer déjà plus préjudiciable. Chacun de ces points contient l'identifiant de l'objet vu à

cette position, nous pouvons donc facilement extraire par exemple la liste des bâtiments ayant perdu la vision sur la Basilique de Fourvière. Nous avons ainsi pu en déduire que 70 bâtiments sur le territoire étudié perdraient cette vision avec les deux projets de tours proposés, dont une majorité se situe à moins de 6 km du point de vue.

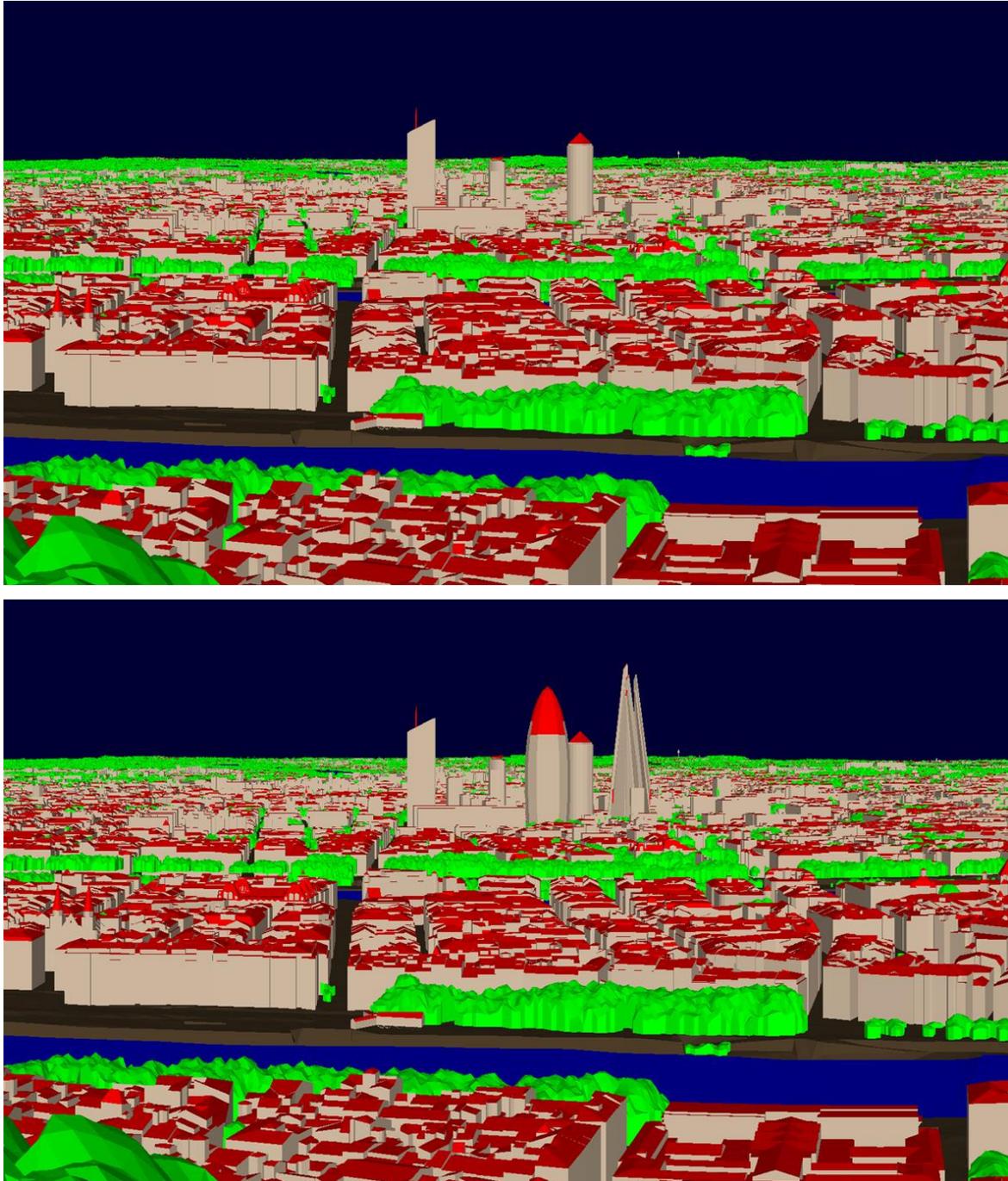


Figure 98: Zoom sur les tours de Lyon. En haut, les tours existantes. En bas, les deux projets de tours imaginaires ont été ajoutés.

Tous les points d'intersection détectés contiennent l'information de l'objet auquel ils correspondent, il est donc également possible de les représenter selon leur type, comme dans la Figure 100 qui contient les points de l'analyse sans les tours imaginaires.

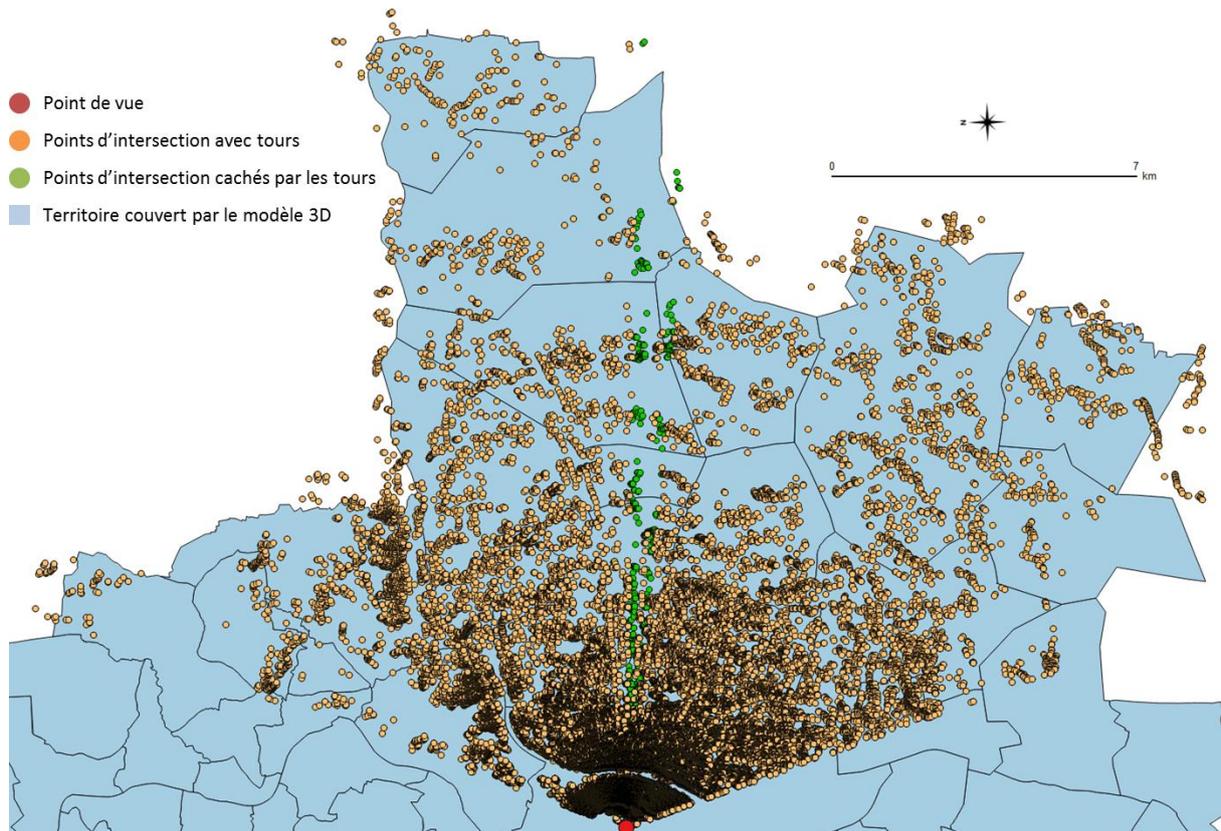


Figure 99: Vue 2D de haut des deux analyses générées. Les points beiges correspondent aux points d'intersection entre des rayons et des objets de la ville, avec les projets de tours imaginaires. Les points verts représentent le résultat avec la vraie version du territoire.

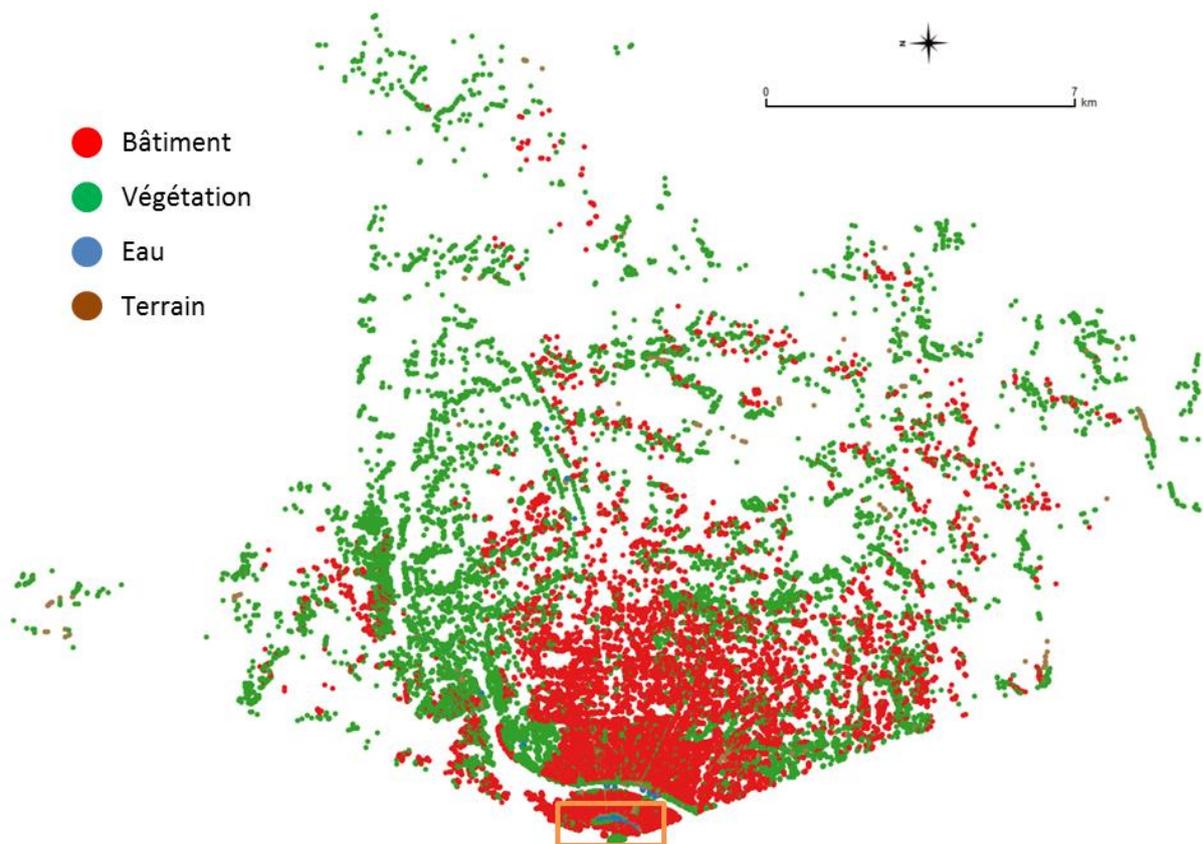


Figure 100: Résultat de l'analyse avec des points 2D colorés selon leur type.

La Figure 101 représente les points de la zone encadrée en orange, superposés à l'orthophotographie. Nous pouvons notamment constater l'absence des ponts dans le modèle 3D étudié puisque les points correspondants sont simplement détectés comme représentant de l'eau.

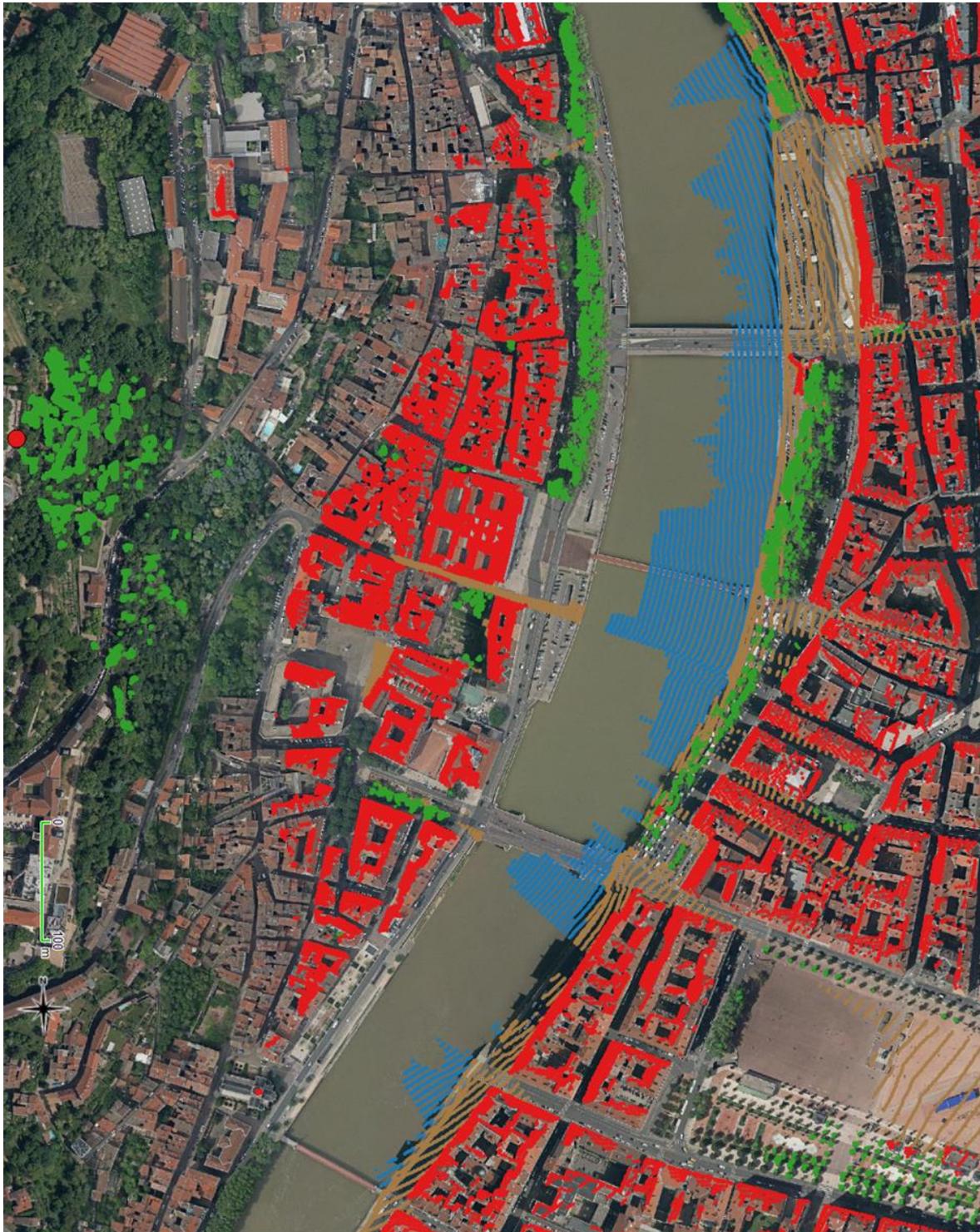


Figure 101: Points d'intersection colorisés selon le type de l'objet correspondant. Ces points sont superposés à l'orthophotographie de la zone, qui est celle encadrée en orange dans la Figure 100.

Avec les différents types d'objets contenus dans le modèle 3D, nous sommes capables de fournir une quantification de la composition de la vue. La Figure 102 représente cette composition de vue pour les deux versions (les différences apportées par les tours sont trop faibles pour avoir une répercussion à ce niveau). Il est à noter que les images présentées dans ce manuscrit Figure 97 ont été tronquées au niveau du ciel, ce qui explique le haut pourcentage de ciel qui ne se retrouvait pas dans celles-ci. Le haut pourcentage de végétation est directement lié aux zones de végétation située en dessous du point de vue, qui correspondent à des arbres proches et qui occupent donc une place importante du champ de vision. Si ceci représente fidèlement la vue telle qu'elle est depuis l'esplanade, il est intéressant de noter qu'un point de vue situé en haut de la Basilique de Fourvière fournirait probablement une vue très différente puisqu'elle ne serait plus impactée par ces arbres proches.

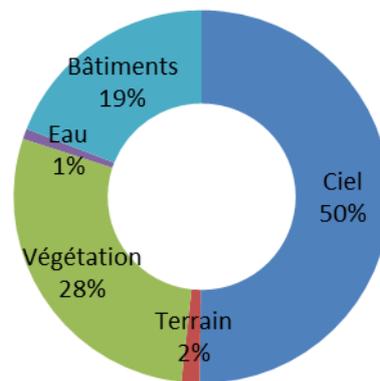


Figure 102: Composition de la vue selon les différents types d'objets présents dans le modèle 3D.

Nous pouvons également mesurer l'impact de ces tours sur le skyline de la ville tel qu'il est visible depuis ce point de vue. La Figure 103 représente les skylines des deux versions de la ville, limitée au zoom présenté dans la Figure 98. Nous pouvons notamment y voir en bas l'impact important des deux tours ajoutées.

La Figure 104 propose une vue du dessus des deux versions du skyline, ce qui permet notamment de voir l'impact des tours qui déforment son tracé. Ce changement a également des répercussions sur la composition des objets qui définissent ce skyline, comme le montre la Figure 105.

Nous venons de montrer quelques exemples d'interprétation des résultats générés par notre méthode, mais il est possible d'en imaginer beaucoup d'autres, notamment faisant intervenir des jeux de données externes (par exemple : les tracés de chemin de randonnée permettant de déterminer si la Basilique de Fourvière est visible au cours de leurs trajets).

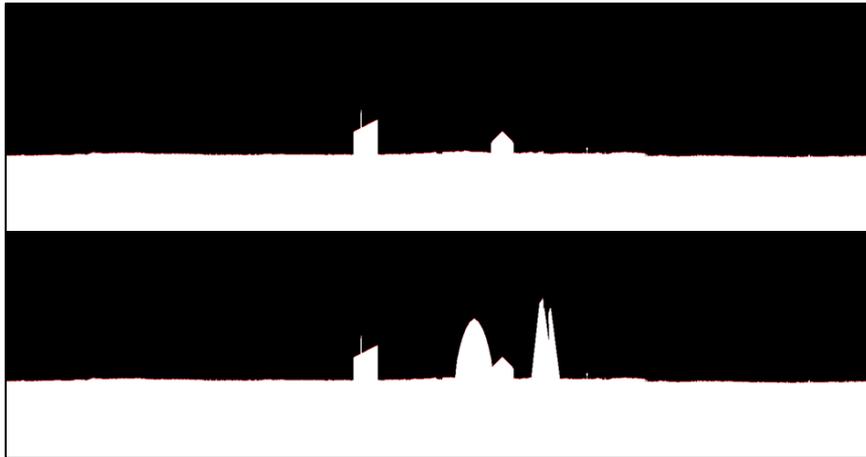


Figure 103: Les skylines correspondant aux images de la Figure 98. En haut, sans les tours. En bas, avec les tours imaginaires.

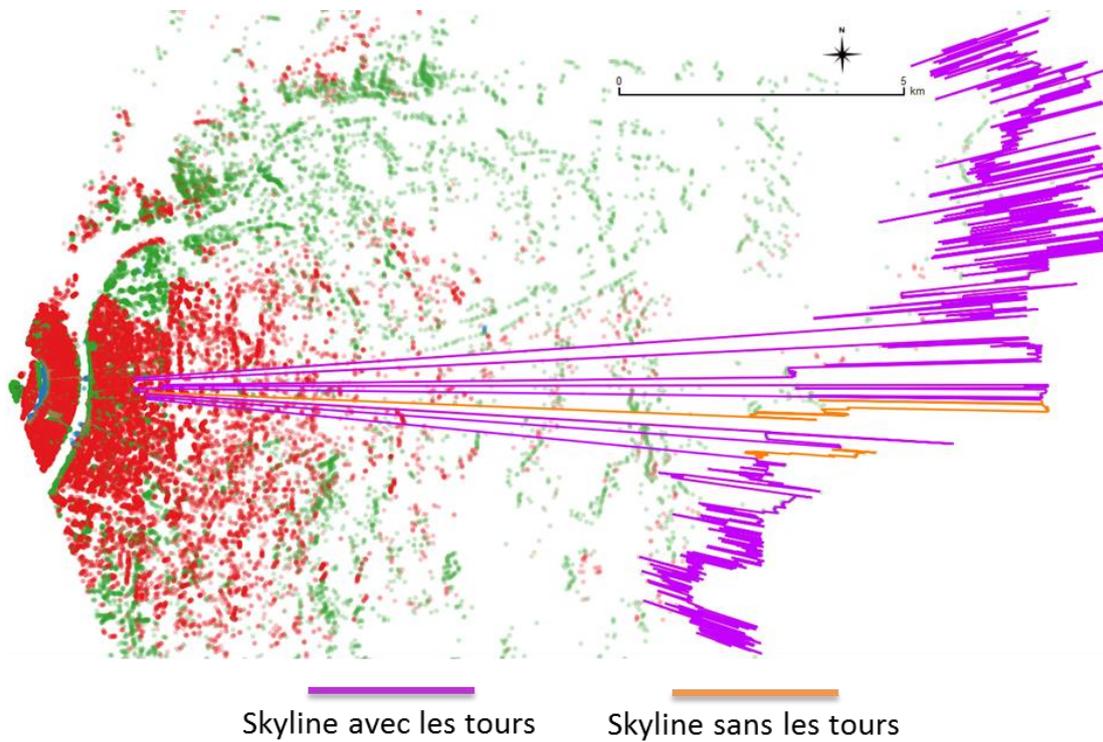


Figure 104: Skylines 2D vus du dessus.

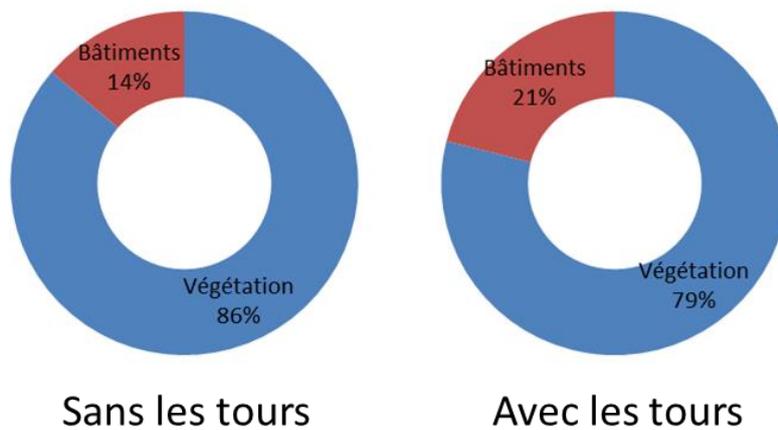


Figure 105: Composition des objets formant les skylines.

Afin d'évaluer l'apport de notre méthode en termes de précision par rapport aux analyses existantes, nous avons analysé la visibilité d'un monument lyonnais bien connu, la Basilique de Fourvière, situé sur une des collines de la ville et visible depuis de nombreux endroits proches et lointains. Nous avons réalisé une analyse à l'aide d'un outil SIG répandu (ArcGIS⁶¹) utilisant un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) raster à 1 mètre de résolution, ainsi qu'une analyse à l'aide de notre méthode utilisant des données vectorielles 3D en CityGML. La comparaison des résultats s'est faite sur le périmètre de la ville de Lyon (48 km²), faute de pouvoir produire des résultats assez précis sur une plus large étendue avec l'analyse raster d'ArcGIS. Pour gérer un plus grand territoire par cet outil, il aurait fallu exploiter un MNE bien moins résolu et la pertinence de l'analyse en aurait été grandement amoindrie (nous serions par exemple incapable de détecter une importante partie des bâtiments et de la végétation avec une résolution de 25m). Une comparaison visuelle en 2D des résultats montre des résultats relativement semblables, avec des étendues spatiales des zones visibles semblant assez proches. La visualisation 3D des résultats montre néanmoins une importante différence dans la précision géométrique des résultats.

Nous allons cependant ici nous concentrer sur l'analyse quantitative des résultats permettant de mettre en avant les atouts de notre méthode en matière de précision par rapport aux analyses raster actuellement utilisées. Le Tableau 6 indique le nombre total de points visibles, depuis le point de vue choisi générés, par notre méthode, le nombre de points communs aux deux analyses ainsi que le pourcentage correspondant aux résultats de notre analyse qui ne trouvent pas de correspondance dans les résultats de l'analyse raster (points visibles "manqués" par l'analyse raster). La première colonne donne la comparaison brute du nombre de points, la seconde propose la même comparaison en ajoutant un buffer d'un mètre autour des points résultats (un point 3D devient un disque d'1m de diamètre), afin de ramener les résultats de notre méthode à la résolution du modèle numérique d'élévation utilisé pour l'analyse raster. La troisième colonne donne la comparaison pour les résultats de l'analyse de visibilité au-delà d'un km autour du point d'observation.

⁶¹ <http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis>

Tableau 6: Différence entre les résultats de l'analyse de visibilité raster et ceux issus de notre méthode, pour l'analyse de visibilité de la basilique de Fourvière.

	Comparaison brute des résultats	Comparaison des résultats en ajoutant un buffer de 1m aux résultats issus de notre outil	Comparaison pour les points au-delà d'1km du point de vue d'observation
Total des points issus de notre outil	650 048	650 048	47 491
Total des points qui font partie des zones considérées visibles par l'analyse de visibilité SIG	415 976	497 068	44 262
Différence (points non considérés comme visible par l'analyse SIG)	234 072	152 980	3 229
Différence en pourcentage	36%	23,50%	7%

Le Tableau 6 montre que la différence de précision entre nos résultats et ceux issues d'une analyse raster est plus importante pour les zones proches du point de vue choisi. Cela s'explique par la méthode utilisée, les résultats du lancer de rayon donnant une maille plus précise sur des courtes distances. Ainsi, sur les distances proches (inférieures à 1 km du point d'observation), le surplus de précision est important. Pour les distances lointaines, ce surplus de précision n'est pas non plus négligeable, et confirme l'intérêt de la méthode que nous proposons (lancer de rayon à partir des données vecteur 3D) pour des analyses de lieux proches comme lointains. Bien que les résultats soient moins précis sur des distances lointaines, leur précision reste ici supérieure aux résultats des analyses raster, qui sont, comme nous l'avons déjà évoqué, limitées en résolution pour des analyses sur de grands territoires. De plus, la précision de notre méthode dépend des paramètres choisis et il sera donc possible de la régler en fonction des besoins.

Pour confirmer nos premiers résultats, nous avons répété ces comparaisons pour des analyses de visibilité depuis le sommet de quatre autres monuments emblématiques du paysage urbain lyonnais. Le Tableau 7 propose ainsi les résultats bruts de la comparaison, le Tableau 8 propose la comparaison après avoir appliqué le buffer de 1m aux points résultants de notre analyse, puis le Tableau 9 propose une comparaison des données brutes mais uniquement pour les points situés à plus de 1km du point de vue.

Tableau 7: Résultats issus de la comparaison brute.

	Basilique de Fourvière	Hôtel de Ville	Opéra	Cathédrale Saint-Jean	Tour Part-Dieu
Total des points 3D issus de notre outil	650 048	683 096	680 978	712 178	640 821
Total des points qui font partie des zones considérées visibles par l'analyse de visibilité SIG	415 976	395 146	488 047	304 519	570 783
Différence (points non considérés comme visible par l'analyse SIG)	234 072	287 950	192 931	407 659	70 038
Différence en pourcentage	36%	42,20%	28,30%	57,24%	11%

Tableau 8: Résultats issus de la comparaison avec ajout d'un buffer d'un mètre autour des points issus de notre méthode.

	Basilique de Fourvière	Hôtel de Ville	Opéra	Cathédrale Saint-Jean	Tour Part-Dieu
Total des points 3D issus de notre outil	650 048	683 096	680 978	712 178	640 821
Total des points qui font partie des zones considérées visibles par l'analyse de visibilité SIG	497 068	449 269	552 247	364 803	625 114
Différence (points non considérés comme visible par l'analyse SIG)	152 980	233 827	128 731	347 375	15 707
Différence en pourcentage	23.5%	34,23%	18,90%	48,78%	2%

Tableau 9: Résultats pour la comparaison des points au-delà d'un km.

	Basilique de Fourvière	Hôtel de Ville	Opéra	Cathédrale Saint-Jean	Tour Part-Dieu
Total des points 3D issus de notre outil	47 491	11 102	12 091	6 702	49 197
Total des points qui font partie des zones considérées visibles par l'analyse de visibilité SIG	44 262	11 102	12 091	6 702	46 192
Différence (points non considérés comme visible par l'analyse SIG)	3 229	0	0	0	3 005
Différence en pourcentage	7%	0,00%	0,00%	0,00%	6%

On note une différence plus notable pour certains monuments en matière de données lointaines (au-delà d'1km). Cela s'explique par la morphologie urbaine de Lyon et le positionnement de certains monuments, qui ne sont pas visibles depuis des zones éloignées du centre de la ville car entourés par les collines de la ville ; cela explique les différences à 0% entre notre analyse et celle issue de ArcGIS pour l'Hôtel de ville, l'Opéra et la Cathédrale Saint-Jean. Par ailleurs, pour ces mêmes monuments, très insérés dans un tissu urbain dense, on note que les résultats issus de notre méthode sont beaucoup plus précis pour le tissu urbain proche (à moins d'un kilomètre du monument). Nous pouvons ainsi montrer l'apport de notre méthode, plus précise que l'analyse issue d'un raster et adaptée à la fois aux analyses en centre urbain dense et pour obtenir des données fiables sur de grandes distances. Nous rappelons cependant que les tests ont été ici limités à la ville de Lyon, soit 48 km² à cause des limitations de l'outil étudié et des données qu'il exploite.

4.2.2 Mesurer l'impact en termes d'ombre et d'ensoleillement des objets urbains

Cette section reprend des éléments présentés dans l'article suivant :

Jaillot V., Pedrinis F., Servigne S., Gesquière G. (2017). "A generic approach for sunlight and shadow impact computation on large city models". In World Society for Computer Graphics (WSCG) 2017.

Si de nombreuses études mesurent l'impact du soleil sur les objets de la ville, aucune ne considère vraiment l'impact en termes d'ombre qu'ils ont sur les autres objets de la ville. Au-delà de savoir quels sont les objets de la ville éclairés ou à l'ombre à un moment donné, il peut également être nécessaire de connaître les objets qui créent ces ombres afin de quantifier l'impact d'un objet donné sur son territoire en termes d'ensoleillement.

Nous avons donc proposé une méthode permettant de mesurer l'impact en termes d'ombre de tous les objets d'un modèle 3D, qui se base sur un processus de lancer de rayons partant cette fois-ci de ces objets jusqu'au soleil sur une période donnée afin de déterminer quand est-ce qu'il est ensoleillé et quand est-ce qu'il ombragé, et par quoi. Les résultats permettent ainsi de mesurer l'impact en termes d'ombre générée de chaque objet puisque nous possédons la liste de tous les objets qu'il a impacté sur la période étudiée. De plus, nous désirons pouvoir générer de telle analyse sur un vaste territoire et sur une période temporelle définie par l'utilisateur. La méthode mise en place est résumée dans la Figure 106.

Ce calcul d'ensoleillement nécessite de connaître la position du soleil pour chaque pas de la période choisie. En considérant que les rayons du soleil sont parallèles, nous avons uniquement besoin de connaître ses angles d'azimut et d'élévation afin de connaître la direction de ces rayons (Figure 107).

[Mic88] présente un algorithme permettant de calculer ces angles pour n'importe quelle date située entre les années 1950 et 2050 avec une incertitude de $\pm 0.01^\circ$, ce qui est acceptable pour notre application. Nous utilisons donc cette méthode afin de calculer les N positions du soleil correspondant aux N dates partitionnant la période temporelle que l'on souhaite étudier.

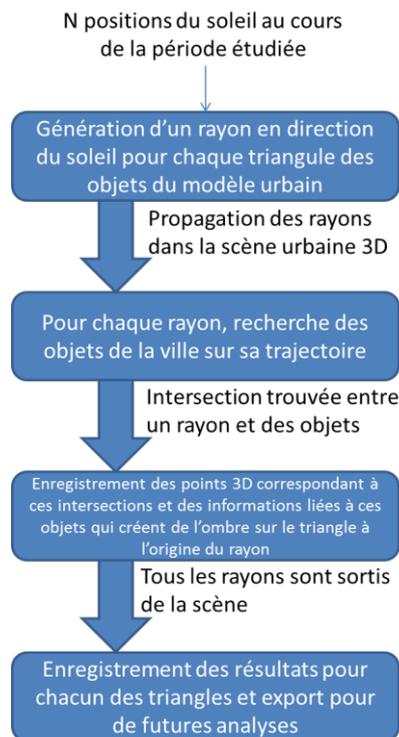


Figure 106: Etapes de la méthode permettant de mesurer l'impact en termes d'ombre et d'ensoleillement des objets de la ville.

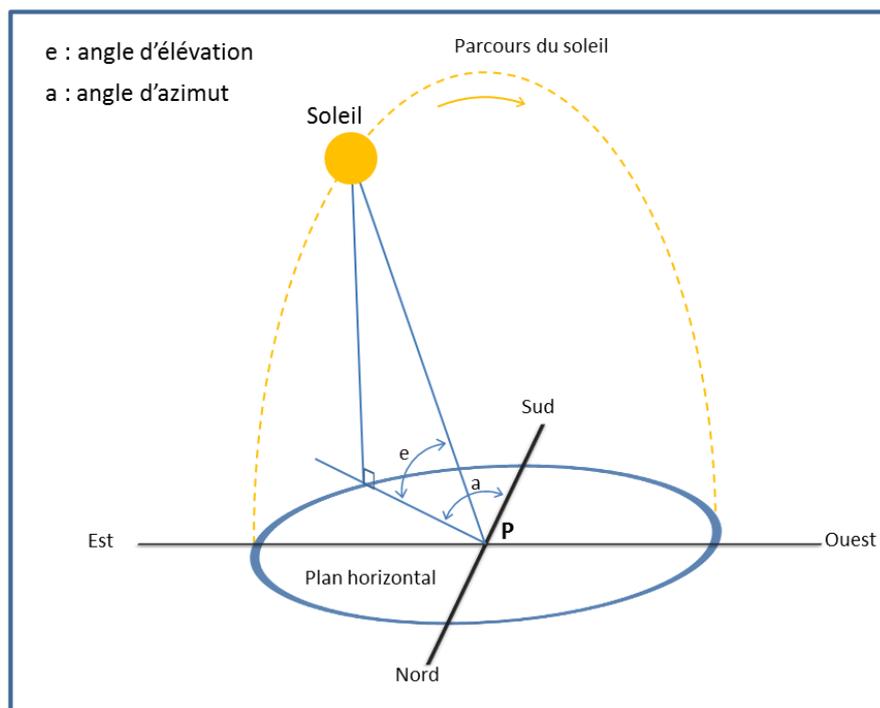


Figure 107: Position du soleil par rapport à un point local P.

Une analyse d'ensoleillement et d'ombre sera générée pour chacune de ces dates, en générant des rayons provenant de chaque objet du modèle virtuel de la ville et se propageant en direction des positions du soleil correspondantes. Nous devons ensuite détecter pour chaque rayon les éventuelles intersections qu'il peut rencontrer avec la géométrie 3D des autres

éléments de la ville. S'il n'en trouve aucune, cela signifie que le point depuis lequel il a été émis est directement exposé à l'ensoleillement. Sinon, chaque objet qui intersecte ce rayon est identifié comme faisant de l'ombre sur cette origine, qui est alors considérée comme étant à l'ombre. Tous ces calculs sont effectués dans un contexte simplifié de ciel dégagé. Afin de pouvoir gérer le modèle urbain dans sa globalité, nous avons ici choisi d'utiliser la Semantic Bounding Volume Hierarchy (présentée dans la section 3.2.2) définie sur le modèle tuilé.

Le cœur de la méthode consiste à parcourir tous les objets du modèle virtuel étudié, à en générer un ensemble de rayons dont ils sont les origines et qui se propagent en direction des N positions du soleil, puis de parcourir le territoire du modèle urbain afin de propager ces rayons et trouver leurs intersections avec les autres objets de la ville.

Comme introduit précédemment, nous allons pour cela utiliser la structure en semantic Bounding Volume Hierarchy (sBVH) illustrée dans la Figure 65. C'est une hiérarchie de boîtes englobantes basée sur la sémantique du modèle 3D, qui nous permettra de limiter le nombre de calculs d'intersection à effectuer entre les rayons et les géométries 3D des objets urbains en orientant rapidement les rayons vers les objets qu'ils peuvent rencontrer. Chaque niveau de cette hiérarchie correspond à un niveau sémantique du modèle et une boîte englobante est calculée pour chaque élément.

Il est ainsi possible de parcourir rapidement le modèle urbain en réalisant les calculs d'intersection des rayons avec ces boîtes englobantes : si un rayon intersecte la boîte d'un objet donné, alors nous pouvons ensuite faire le test avec les boîtes englobantes des éléments fils de cet objet jusqu'à atteindre, éventuellement, le dernier niveau qui contient la géométrie 3D. L'avantage de ce parcours est que les calculs d'intersection à effectuer sont bien plus simples et rapides avec des boîtes englobantes qu'avec les géométries 3D complexes des objets de la ville. Il est ainsi possible d'éliminer rapidement les objets ne pouvant se trouver sur la trajectoire des rayons sans avoir besoin d'effectuer ces calculs plus lourds.

Soit N rayons générés depuis une même origine et dirigés vers les N positions du soleil. Nous désirons parcourir la sBVH jusqu'à parvenir au niveau le plus bas (celui qui contient les géométries 3D) pour les objets pouvant être sur la trajectoire d'un rayon. Pour chaque objet du niveau le plus bas de la hiérarchie, nous stockons la liste des rayons qui sont parvenus jusqu'à lui. Chacun de ces rayons contient un lien vers son origine et la date et l'heure correspondant à la position solaire pour laquelle il a été généré. Afin d'éviter des calculs

inutiles, nous ne générons pas de rayons lorsque la surface du polygone depuis lequel il devrait être généré n'est pas orientée en direction du soleil. En effet, cela signifie que cette surface est quoi qu'il en soit à l'ombre puisque cachée par l'objet lui-même. Il est donc inutile de propager ces rayons qui alourdiront le processus.

Après avoir généré tous les rayons et les avoir liés aux objets dont ils coupent les boîtes englobantes, nous pouvons alors charger la géométrie 3D de ces objets et réaliser les tests d'intersection entre elle et la liste des rayons stockés dans chaque objet.

De cette manière, nous n'avons à charger la géométrie de chaque objet qu'une seule fois pour tous les rayons qui ont une probabilité de l'intersecter. Ainsi, pour un rayon généré depuis un objet O1, si nous trouvons une intersection avec la géométrie de l'objet O2, nous stockons l'information que O2 ombrage O1 au moment défini par le rayon. Une fois le calcul effectué sur l'ensemble du modèle urbain, il est alors possible de mesurer l'impact ombragé de chaque élément de la ville puisque nous connaissons tous les objets sur lesquels il a une influence au cours de la période étudiée.

La Figure 108 illustre un exemple de parcours de la sBVH par trois rayons générés depuis le bâtiment B et correspondant à trois positions du soleil calculées pour 3 heures différentes d'une même journée. La sBVH correspondante est représentée.

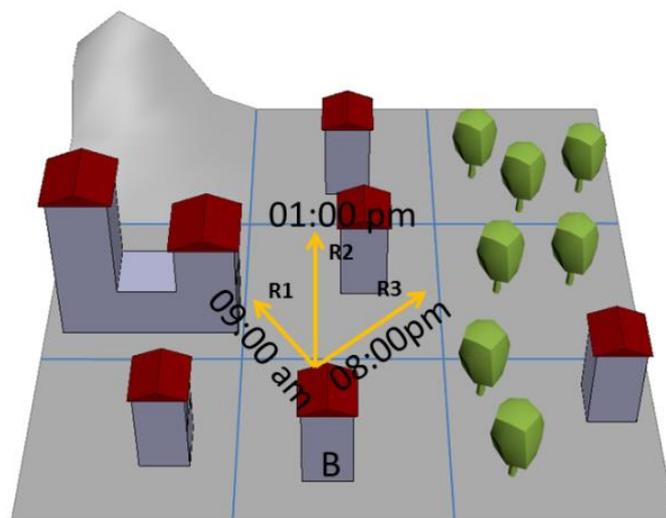


Figure 108: 3 rayons correspondant à 3 heures différentes, sont générées depuis un bâtiment en direction du soleil, dans un modèle urbain simple composé de 9 tuiles et types d'objets différents (terrain, bâtiments et végétation).

Selon le premier niveau de la sBVH, il faut, pour chaque rayon {R1, R2, R3}, chercher la liste des tuiles dont les boîtes englobantes se trouvent sur la trajectoire, comme illustré dans la Figure 110.



Figure 109: Semantic Bounding Volume Hierarchy de la scène illustrée Figure 108.

Les boîtes BB2, BB3, BB4 et BB7 sont intersectés par au moins un rayon, ce qui signifie que nous allons aller plus bas dans la hiérarchie pour les 4 tuiles correspondantes. Les autres tuiles sont laissées de côté puisqu'elles n'auront aucune influence sur l'ombrage du bâtiment B. Nous avons ainsi un lien entre le rayon R1 et les tuiles BB1 et BB2, entre R2 et BB4 et entre R3 et BB7. Pour ces 3 tuiles retenues, nous passons donc au niveau suivant de la hiérarchie en testant les boîtes englobantes du premier niveau d'objets sémantiquement définis, avec les rayons correspondant (Figure 111).

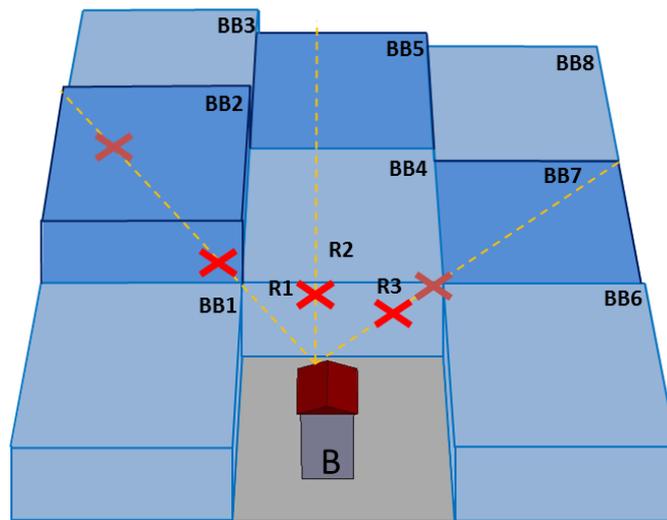


Figure 110: Calculs d'intersection entre les trois rayons {R1, R2, R3} et les boîtes englobantes de 9 tuiles du modèle urbain.

Nous trouvons ainsi que le rayon R1 intersecte le bâtiment B1, mais pas le terrain, de la tuile BB1, ainsi que le terrain T1 de la tuile BB3. R2 n'intersecte ni le bâtiment B2 de BB4, ni son terrain. Quant à R3, il n'intersecte pas le terrain de BB7 mais il coupe la boîte englobante de l'objet végétation V1. Puisque R2 ne contient plus aucun objet à parcourir, nous pouvons déjà en conclure que le point originaire des rayons et positionné sur le bâtiment B est ensoleillé à 01:00pm. Pour R1 et R3, nous pouvons poursuivre le parcours de la sBVH en descendant d'un niveau pour les objets T1, B1 et V1.

Cependant, l'objet terrain T1 correspond ici au plus bas niveau de la hiérarchie dans sa branche et ne contient aucun sous élément. Il n'y a donc plus de tests à effectuer pour lui et nous lui lions juste le rayon R2 que nous utiliserons ultérieurement lorsque nous chargerons sa géométrie 3D.

Le prochain niveau de test est représenté dans la Figure 112. Nous en déterminons que le rayon R1 intersecte uniquement le mur W1 du bâtiment B1, et que le rayon R3 intersecte l'arbre Tr1. Tous les autres éléments sont donc ignorés. W1 et Tr1 représentent des éléments du plus bas niveau dans leurs branches respectives, ce sont eux qui contiennent une géométrie 3D. Puisque R1, R2 et R3 n'ont plus de boîtes englobantes à tester, cela signifie que le parcours de la sBVH est terminé. Nous avons ainsi R1 qui est lié à T1 et W1, et R3 lié à Tr1.

La prochaine et dernière étape consiste à charger les géométries 3D de ces objets, et de regarder si les rayons qui sont liés à chacun d'entre eux ont une intersection avec leur géométrie (Figure 113). Nous trouvons bien une intersection entre R1 et les géométries 3D de W1 et T1, ainsi qu'entre R3 et Tr1. Nous pouvons donc en conclure que l'origine des rayons

situé sur le bâtiment B est ombragé à 09:00am par le mur W1 du bâtiment B1, mais également par le terrain T1 situé derrière, est ensuite ensoleillée à 01:00pm, mais revient à l'ombre à 08:00pm à cause de l'arbre Tr1 appartenant à l'ensemble de végétation V1.

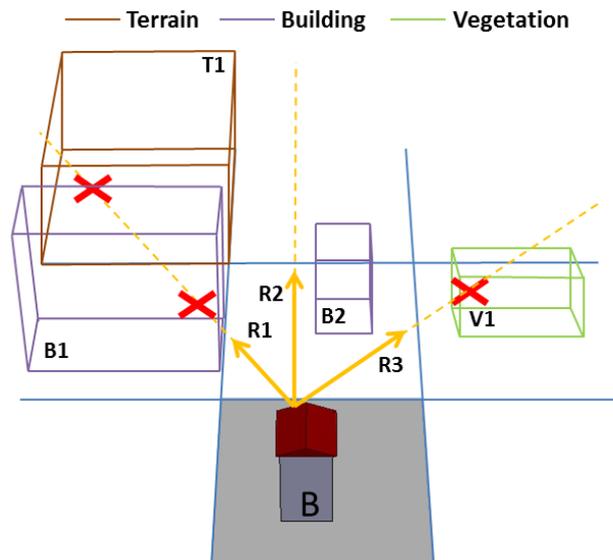


Figure 111: Calculs d'intersections entre chaque rayon et les boîtes englobantes des objets contenus dans les tuiles qu'ils ont déjà intersecté.

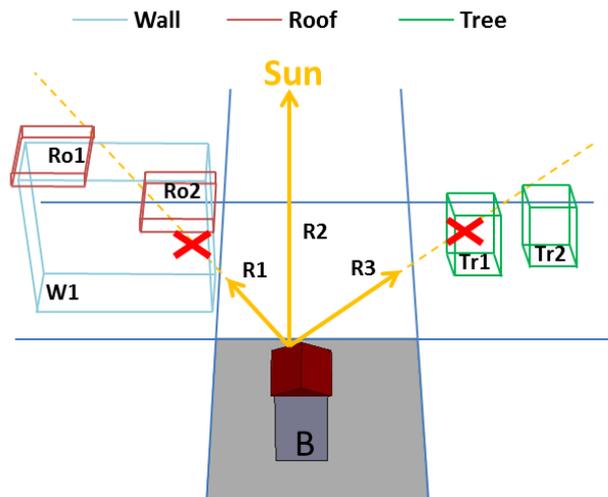


Figure 112: Calculs d'intersection entre les deux rayons restants et les sous éléments des objets précédemment intersectés.

Le fait de savoir que le mur de B1 ainsi que le terrain T1 génèrent tous deux de l'ombre peut avoir son importance. Cela signifie par exemple que détruire le bâtiment B1 ne suffirait pas à apporter de l'ensoleillement en ce point. Ceci permet également de déterminer l'impact global en termes d'ombre de la colline représentée par T1, ce qui ne serait pas possible si nous considérons uniquement tous les bâtiments qui sont eux même mis à l'ombre par T1. Ce type d'analyse justifie le fait de ne pas arrêter un rayon lors de la première intersection.

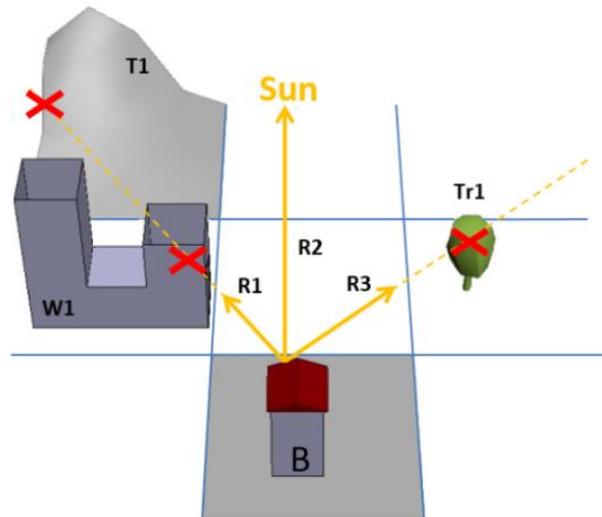


Figure 113: Calcul d'intersection entre les géométries 3D et les rayons liés aux objets correspondants.

Les résultats de notre méthode sont stockés dans une base de données afin d'offrir la possibilité de les agréger à la convenance de l'utilisateur et ainsi les rendre facilement réutilisables pour d'autres calculs. Chaque résultat d'ensoleillement ou d'ombrage est lié aux objets concernés dans le modèle de la ville. Cela permet de récupérer toutes les informations liées aux objets, aussi bien géométriques (par exemple, la surface, le périmètre, etc.) que sémantiques (par exemple, l'adresse d'un bâtiment, le nom d'une route, etc.). Cela permet aux utilisateurs d'agréger de multiples informations permettant diverses applications.

Nous venons de présenter une méthode utilisant un processus de lancer de rayons, qui se propagent depuis des points du modèle de la ville vers la position du soleil afin de déterminer si ces points sont éclairés par le soleil ou s'ils sont ombragés par des objets de la ville. Pour calculer une telle analyse sur le modèle entier de la ville, nous devons donc proposer un processus de discrétisation de celui-ci. Cela permettra de définir l'ensemble des points décrivant les objets de la ville à partir desquels les rayons seront générés.

Nous sommes partis de l'hypothèse que toutes les géométries des objets de la ville sont constituées uniquement de triangles. Comme nous l'avons présenté précédemment, cette condition n'est pas difficile à respecter grâce aux nombreuses méthodes de triangulations qui existent. Nous choisissons de générer un rayon pour chaque triangle existant dans le modèle de la ville. Son origine est le centre du triangle et il est orienté vers les positions du soleil étudiées. Cela induit cependant certaines imprécisions car la triangulation n'est pas nécessairement homogène : certains triangles peuvent couvrir une grande surface mais ne pourront donc posséder qu'un seul résultat correspondant à leur centre. De même, un triangle

trop allongé produira des résultats imprécis avec notre méthode de calcul puisque son centre sera alors peu représentatif de la surface qu'il recouvre.

Afin de répondre à ces problématiques, il serait nécessaire de mettre en place une étape de subdivision triangulaire pour les triangles trop étendus ou trop longs. Cependant, nous voulons présenter ici la méthode de génération de résultats, et de nombreuses méthodes existent déjà pour générer une triangulation précise des modèles 3D, en particulier pour ce type d'application. Par exemple, avant de traiter leur calcul d'enseillement, [ACZO12] et [SAD+12] calculent une triangulation plus précise jusqu'à ce que la surface et l'allongement de chaque triangle soient inférieurs à des valeurs de seuil.

La Figure 114 montre trois tuiles (de 500m par 500m) que nous avons traitées : l'une provenant de la ville de Quincieux (petite ville près de Lyon - à gauche), une autre d'un quartier résidentiel de Francheville (une ville moyenne proche de Lyon - au milieu) et une dernière tuile très dense (en termes de bâtiments) issue du centre-ville de Lyon (à droite). La première est très peu dense en termes de constructions, alors que la seconde et la troisième sont respectivement moyennement et très denses.

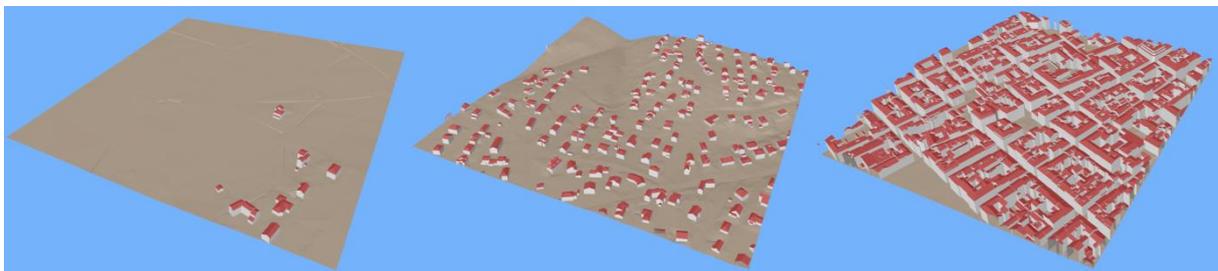


Figure 114: Trois tuiles de (500m par 500m) de densité de bâtiments différentes.

Le Tableau 10 présente les temps de calcul de ces 3 tuiles différentes constitués de deux types d'objets (bâtiments LoD2 et terrain) pour deux périodes temporelles différentes (un jour et un mois) avec dans les deux cas un pas de temps d'une heure.

Ce tableau montre que le calcul peut prendre plus d'une journée pour une seule tuile pendant une période d'un jour dans le cas d'une zone très dense, mais il peut aussi être plus rapide dans certaines régions moins peuplées comme pour les tuiles de Quincieux ou Francheville. Nous pouvons également constater que le calcul d'un mois prend beaucoup moins de temps que ce à quoi nous pourrions nous attendre, à savoir 30 fois (à peu près) le temps de calcul d'un jour. Ceci est dû à la gestion des données présentée précédemment : nous ne chargeons les géométries 3D qu'une fois après avoir détecté tous les rayons qui peuvent les intersecter. Ainsi, la complexité de notre méthode est linéaire mais avec un petit facteur, qui dépend du

territoire traité. Cela signifie que l'augmentation du nombre de positions du soleil (donc la précision en termes de pas temporel) a une faible influence sur les temps de calcul.

Tableau 10: Temps de calcul pour les trois tuiles présentées Figure 114.

Tile	Layer	Triangles	Time Period	Process Time
Quincieux	Buildings	460	1 day	43 s
			1 month	54 s
	Terrain	2840	1 day	8 min 30 s
			1 month	11 min 22 s
Francheville	Buildings	8095	1 day	1h 52 min 12 s
			1 month	3 h 8 min 43 s
	Terrain	13057	1 day	3h 48 min 34 s
			1 month	6 h 35 min 2 s
Lyon	Buildings	35455	1 day	22 h 42 s
			1 month	35 h 56 min 13 s
	Terrain	8767	1 day	6 h 19 min 39 s
			1 month	12h 39 min 20 s

Étant donné que notre objectif est de générer des résultats sémantiquement plus précis que les méthodes habituelles utilisées pour calculer les ombres, notre solution est globalement plus lente. Cependant, elle peut facilement être optimisée en parallélisant les calculs d'intersection entre les rayons et les géométries des objets urbains.

Nous allons maintenant présenter quelques exemples d'applications possibles, dont le but est d'illustrer le type de résultats que notre méthode permet d'obtenir. A noter que les spécialistes du domaine, comme les urbanistes, élaboreront des usages plus pertinents de notre méthode (par exemple pour comparer l'impact sur l'ensoleillement de plusieurs projets de construction concurrents ou pour comprendre pourquoi un parc a été créé dans une certaine zone, etc.).

Nous commençons par analyser l'impact en termes d'ombre de la Tour Part-Dieu à Lyon sur son environnement pendant deux jours différents (les 18/02/2016 et 04/07/2016) pour lesquels nous avons calculé la position du soleil toutes les heures. Cette tour, illustré dans la Figure 115, mesure 165 m de hauteur et son emprise au sol couvre 1 115 m².

La Figure 116 montre l'évolution de la longueur maximale de l'ombre de cette tour le 18/02/2016 (en bleu foncé) et le 04/07/2016 (en bleu clair).

Les courbes ont une forme similaire : une pointe au lever du soleil avant de décroître lentement jusqu'au milieu de la journée, puis un trajet progressivement croissant pendant l'après-midi suivi d'un autre pic juste avant le coucher du soleil. Nous remarquons que les longueurs maximales sont au lever et au coucher du soleil. Cependant lors de ces périodes, lorsque le soleil est bas, les éléments de la ville impactés situés loin de la tour sont

probablement déjà mis à l'ombre par d'autres éléments plus proches d'eux, mais cette mesure donne l'impact théorique de la tour. Toutefois, les résultats générés par la méthode permettent également de récupérer la liste de tous les objets créant de l'ombre sur chaque bâtiment, ce qui permettra de prendre en compte ceci si nécessaire.



Figure 115: La tour Part Dieu à Lyon (165m de haut).

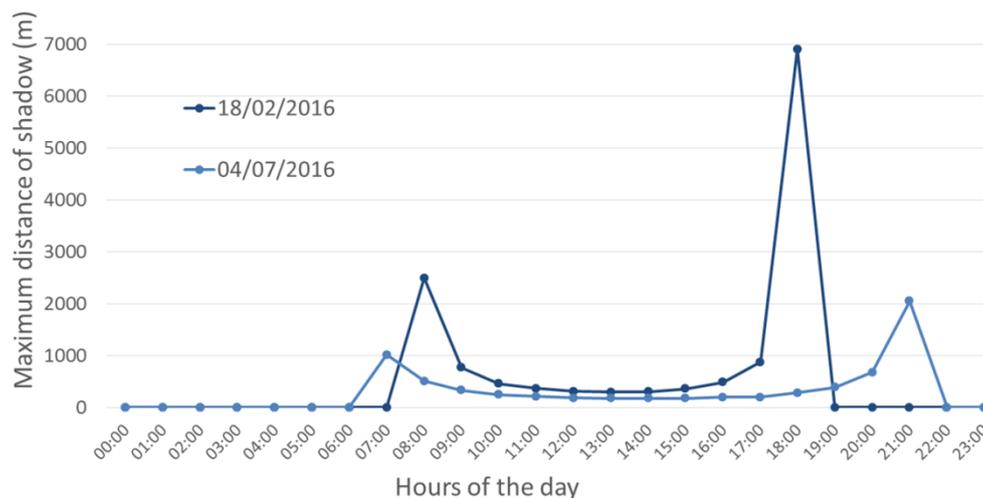


Figure 116: Longueur maximale (en mètres) de l'ombre de la tour Part Dieu sur le territoire alentour.

Pendant le reste de la journée, nous pouvons noter que l'impact reste de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Ceci justifie la volonté de considérer des territoires entiers pour étudier l'ensoleillement et les ombres, afin par exemple de mesurer l'impact total des immeubles de grande hauteur ou de collines. La gestion des données à grande échelle est donc fondamentale pour fournir des résultats complets.

Nous proposons ensuite des diagrammes représentant l'évolution de la surface de l'ombre causée par la tour au cours de la journée. Ces graphiques sont présentés Figure 117. En haut, nous pouvons voir l'évolution de la zone d'ombre sur les bâtiments, et en bas, celle sur le

terrain (sans les bâtiments). Dans les deux graphiques, la courbe en bleu foncé représente les valeurs du 18/02/2016 et celle en bleu clair les valeurs du 04/07/2016.

Nous pouvons coupler ces résultats avec d'autres informations générées en sortie, telles que des informations décrivant les objets concernés (type, fonction, propriétaire, etc.). En outre, nous pouvons générer ces tableaux pour d'autres bâtiments particuliers et comparer leurs impacts d'ombre respectifs. Nous pourrions également générer de telles analyses pour des projets concurrents d'une futur tour, comme nous l'avons fait pour l'analyse de visibilité. Ce type d'application permettrait aux urbanistes de prendre facilement en compte l'impact en ombres de projets concurrents.

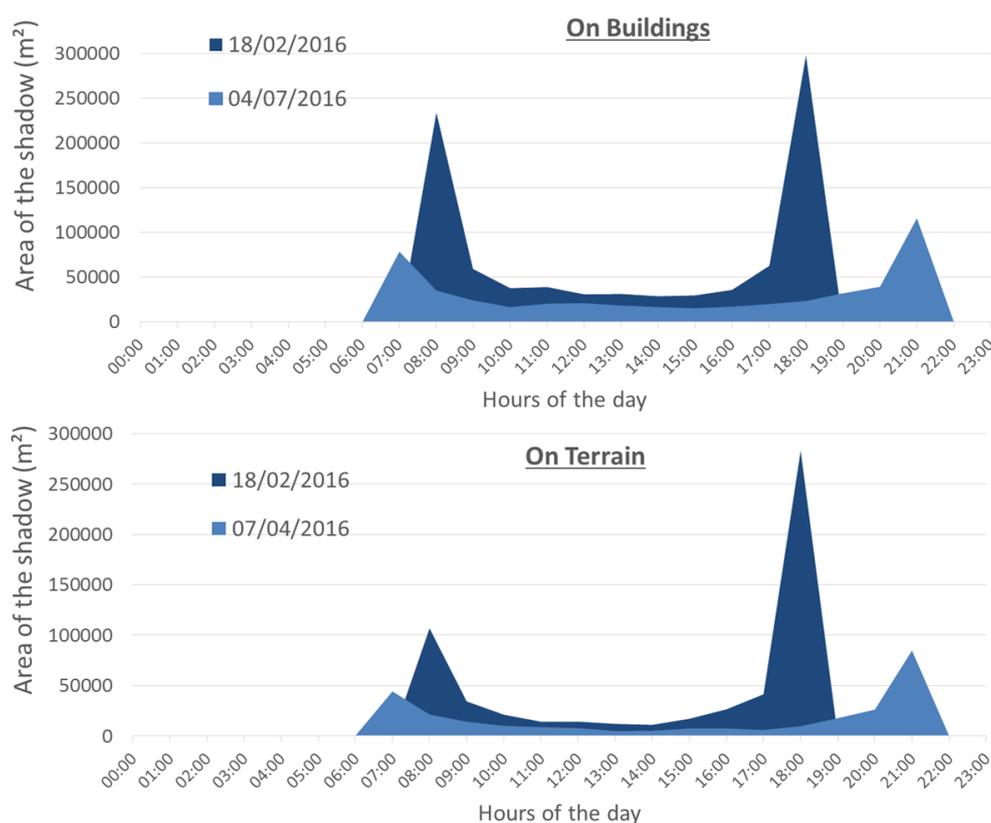


Figure 117: Superficie (en m²) de l'ombre générée par la tour Part Dieu sur les bâtiments (en haut) et sur le terrain (en bas).

Nos résultats peuvent également être exploités pour générer des cartes 2D d'enseillement représentant le nombre d'heures ensoleillées des surfaces non verticales des modèles urbains (comme les toits ou le terrain). La Figure 118 montre la carte d'enseillement de deux tuiles de densités différentes : un quartier de Francheville à gauche et un quartier du centre de Lyon à droite, tous deux le 17 avril 2017. Sur les deux figures, les triangles des modèles sont colorés du bleu au rouge, en fonction du nombre d'heures pendant lesquelles ils sont exposés

au soleil pendant cette journée. Sur la carte d'ensoleillement de la tuile de Francheville (à gauche), nous pouvons distinguer les maisons entourées de petites zones avec peu de soleil (formes rouges entourées de zones bleues et jaunes) et les deux vallées dans le coin supérieur gauche de l'image (zones orange clair). Sur celle de la tuile de Lyon (à droite), nous pouvons remarquer les toits des bâtiments beaucoup plus éclairés que le terrain de leur entourage, ce qui indique que les bâtiments sont assez élevés et proches les uns des autres, contrairement aux maisons de Francheville. Ces cartes d'ensoleillement peuvent, par exemple, aider à identifier quels toits ou quelles zones de terrain ont un fort potentiel photovoltaïque ou pourraient accueillir une agriculture urbaine. Nous pourrions également compléter ces résultats avec les valeurs d'irradiance solaire des toits et du terrain que nous pouvons calculer en utilisant l'une des méthodes présentées, analysées et comparées par [LMF+07]. Une fois que ces valeurs d'irradiance solaire calculées, nous pourrions les stocker avec les informations déjà calculées.

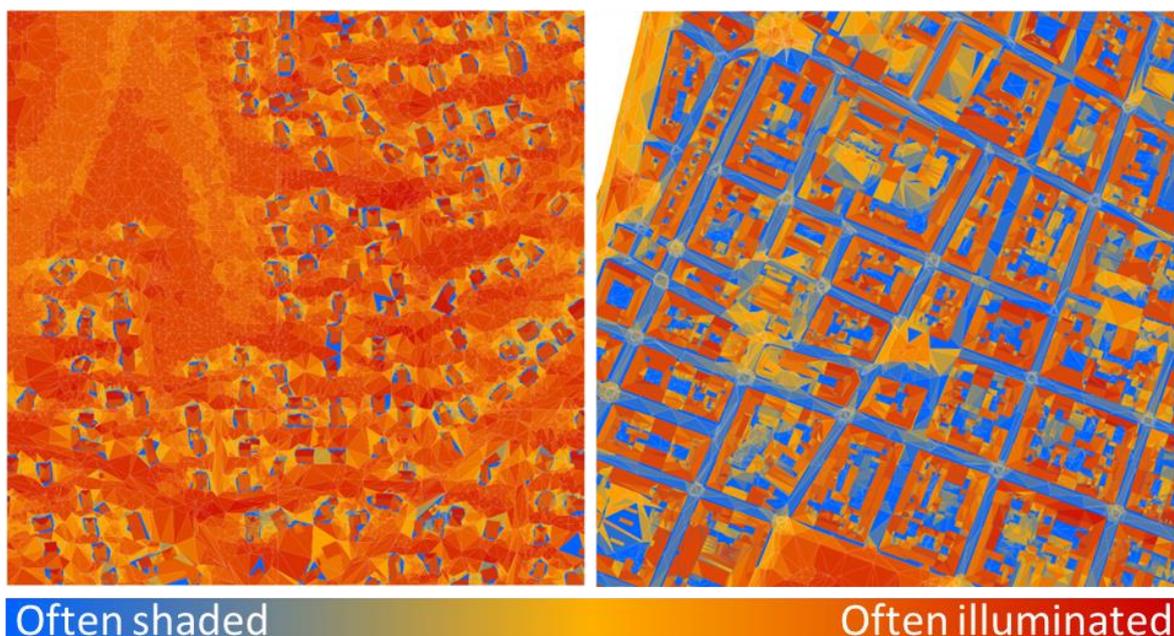


Figure 118: Carte d'ensoleillement pour la journée du 17/04/2017 sur une tuile de la ville de Francheville (à gauche), et sur une autre plus dense en termes de bâtiments correspondant au centre de la ville de Lyon (à droite).

Dans cette illustration, les cartes d'ensoleillement représentent les résultats pour un seul jour, mais il est évidemment possible de générer les mêmes cartes pour une période plus longue (ou plus courte) et de choisir le pas de temps en fonction des besoins. En outre, il est également possible de générer des résultats plus macro que le fait de stocker une valeur par triangle en assignant, par exemple, une unique valeur à chaque bâtiment en fonction de la valeur moyenne des heures d'ensoleillement de ses triangles.

4.2.3 Synthèse

Nous avons présenté deux méthodes permettant de mesurer l'ambiance d'un territoire en analysant la composition de points de vue s'y trouvant, ainsi que son ensoleillement sur une période donnée en mesurant notamment l'impact de ses différents éléments en termes d'ombres générées. Ces mesures permettent de produire des indicateurs pouvant qualifier des éléments particuliers ou des zones définies, et ils peuvent être regroupés afin de proposer une mesure de l'ambiance visuelle présente à ces endroits.

Ces analyses sont cependant lourdes à mettre en place puisque chacune fait intervenir des éléments pouvant se trouver à plusieurs kilomètres les uns des autres. De plus, elles nécessitent des modèles 3D les plus complets possibles puisque tous les éléments urbains ont un impact aussi bien visuel que sur l'ensoleillement du territoire. Ces deux méthodes peuvent donc faire intervenir les travaux précédemment présentés qui consistent à enrichir les modèles virtuels 3D de la ville, en les complétant et en proposant des structures qui les organisent efficacement et facilitent ainsi leur utilisation.

Les indicateurs produits sont générés dans le but de pouvoir être lus, compris et exploités par des praticiens comme des géographes, urbanistes et architectes qui peuvent alors s'en servir pour mettre en place des analyses répondant à des besoins variés. Ceci est rendu possible par l'interopérabilité des résultats qui peuvent facilement être combinés avec des jeux de données externes venant les compléter afin de proposer une interprétation thématique répondant aux différents besoins amenés par les praticiens. Cela se traduit par des résultats exhaustifs mais lourds à stocker et à manipuler.

5. Conclusion

5.1 Bilan

Les modèles virtuels 3D de la ville sont de plus en plus répandus mais ils sont encore incomplets (manque de certains éléments non représentés, manque de précision ...), difficiles à manipuler, à visualiser et à utiliser dans le cadre d'analyses complexes. Les modèles disponibles sont généralement constitués uniquement de terrains et de bâtiments, dont la sémantique est souvent peu présente, alors que d'autres données existantes contiennent des informations permettant de les enrichir. Puisque les standards d'échange de ces modèles 3D offrent la possibilité de représenter un certain nombre d'éléments absents des modèles répandus, il nous semble intéressant d'exploiter ces informations complémentaires provenant de jeux de données hétérogènes déjà existants afin d'enrichir le modèle 3D ou d'obtenir grâce à ce croisement d'autres jeux de données avec une forte valeur ajoutée.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes d'abord intéressés à enrichir le modèle 3D de la ville en proposant une représentation sémantiquement plus fine de ses bâtiments grâce à l'apport d'un jeu de données comme le cadastre qui définit précisément les bâtiments d'un territoire. Les identifiants cadastraux mis en relation avec le modèle 3D reconstruit permettent ainsi une liaison vers d'autres jeux de données. Le modèle 3D en entrée et le cadastre représentent néanmoins des données très différentes selon plusieurs critères (différentes méthodes et dates d'acquisition, différents types de représentation, etc.), leur mise en relation n'est donc pas parfaite, notamment sur des cas particuliers sur lesquels même des experts peuvent avoir des interprétations différentes lors d'un traitement manuel. Néanmoins, le cadastre n'est pas toujours fiable dans la description des constructions et le modèle 3D produit pourra donc véhiculer ces imprécisions. Cependant, cette méthode pourra également aider à la mise à jour du cadastre, en détectant des erreurs potentielles lorsqu'il diffère trop du modèle 3D.

Nous avons ensuite proposé d'ajouter au modèle urbain une représentation 3D de la végétation, qui n'est que très rarement présente dans des modèles urbains 3D, générée automatiquement à partir de nuages de points LiDAR aériens et d'orthophotographies infrarouges. Cette représentation modélise une canopée végétale 3D triangulée représentant le

sommet des zones de haute végétation de la ville, dont les arbres isolés. Ces modèles 3D de végétation ont cependant été générés uniquement via des données aériennes, ils ne proposent donc logiquement pas de représentation satisfaisante depuis un point de vue terrestre.

Les territoires modélisés sont potentiellement très étendus ; la métropole de Lyon s'étale par exemple sur 550 kilomètres carrés. Cette modélisation est composée d'éléments de natures diverses (bâtiments, routes, végétation, etc.). Afin de pouvoir manipuler ces modèles 3D qui sont constitués d'objets définis géométriquement, sémantiquement et topologiquement, il est nécessaire de mettre en place des structures de données permettant de les mobiliser efficacement. Cette organisation doit permettre leur utilisation grâce à un parcours efficace de leurs éléments selon leurs géométries, mais également selon leurs sémantiques et topologies. Nous avons dans cet objectif proposé trois structures organisant un modèle virtuel 3D de la ville selon différents critères.

La première est un tuilage partitionnant le territoire en un ensemble de cellules indépendantes, qui peuvent ensuite être organisées hiérarchiquement dans une structure arborescente. Ce tuilage 2D fractionne les éléments de la ville selon leurs coordonnées. Cette méthode nous a amené à proposer des stratégies de gestion des objets de la ville en intersection avec une frontière. La seconde structure permet de parcourir les éléments d'un modèle virtuel via une hiérarchie de boîtes englobantes évitant ainsi d'avoir à traiter l'ensemble de leurs géométries 3D lors d'un traitement. Puisque les objets d'un modèle virtuel de ville sont définis selon une hiérarchie d'éléments et de sous éléments, nous exploitons ceci afin de mettre en place une hiérarchie de boîtes englobantes basée sur la sémantique et la topologie du modèle, ce qui diffère des approches usuelles de hiérarchies de boîtes basées uniquement sur la géométrie. Par exemple, si un bâtiment est composé de murs et de toits et que seul un mur s'avère finalement concerné géométriquement par un traitement, il est intéressant de pouvoir rapidement éliminer le toit grâce à sa boîte englobante sans avoir eu à gérer sa géométrie 3D complète. Dans d'autres cas, il sera nécessaire de s'intéresser à la géométrie complète du bâtiment et ainsi à la boîte qui lui correspond. Appliquer ce principe à l'échelle d'une ville entière contenant des objets possédant plusieurs niveaux hiérarchiques permet d'en faciliter le parcours.

Enfin, la dernière organisation utilise des critères géométriques et sémantiques, notamment issus du réseau routier, afin de partitionner le territoire en différents niveaux d'îlots urbains imbriqués et proposer ainsi une vue hiérarchisée de la ville grâce à ses éléments structurants

(comme les grands boulevards par exemple). Cette découpe du territoire propose une représentation hiérarchisée visuellement pertinente du territoire de la ville qui est pleinement utilisée dans le cadre de travaux sur la visualisation 3D menés dans notre équipe.

Posséder un modèle riche décrivant le plus fidèlement possible l'environnement urbain favorise la mise en place d'indicateurs pertinents permettant de « mesurer » et analyser la ville dans le temps, à condition de pouvoir parcourir efficacement son territoire et ses objets.

Les différents millésimes de modèles 3D sont actuellement traités de manière indépendante et il paraît nécessaire de proposer une représentation pouvant stocker les évolutions de la ville dans un unique modèle prenant en compte la dimension temporelle. Il est alors nécessaire de proposer des méthodes pour comparer plusieurs millésimes afin de détecter les éventuels changements et de référencer un modèle initial et ses évolutions plutôt qu'un ensemble de millésimes indépendants.

Nous avons donc proposé de nouvelles méthodes permettant de détecter automatiquement les changements apparus sur les bâtiments entre deux représentations acquises à deux dates différentes. Cette détection de changement peut reposer sur des nuages de points et/ou des modèles polygonaux structurés en CityGML. Dans le cas où nous comparons des modèles polygonaux, il est possible de s'appuyer sur notre algorithme de découpe et d'appariement de bâtiments 3D avec le cadastre s'il est disponible, afin de proposer des résultats plus pertinents. Dans le cas où nous ne disposons que de nuages de points, il a été nécessaire d'utiliser une méthode de classification des points afin d'identifier les zones correspondant à des bâtiments et ainsi pouvoir les comparer.

Il existe de nombreuses manières de mesurer et d'analyser la ville et ses éléments, mais l'un des paramètres les plus importants, car accessible à tous, est son aspect visuel. Chaque ville a une « ambiance » particulière, et cela passe en grande partie par la qualité des vues qu'elle propose, mais aussi à qui elle les délivre. Cette vue est directement impactée par les éléments de la ville mais également par l'ensoleillement et donc l'ombre produite par ceux-ci. La composition d'un champ de vision peut être mesurée selon de nombreux paramètres qui ne mobilisent pas forcément directement un modèle 3D. Néanmoins, grâce à ce modèle 3D il est possible de simuler le fonctionnement physique de la vision et de l'ensoleillement. Cette simulation permet de générer une base de résultats (par exemple, référencer les objets visibles depuis un point de vue, ou ceux à l'ombre à un certain moment de la journée) pouvant ensuite être liés aux paramètres désirés (comme des indicateurs socio-économiques) afin de

caractériser les objets de la ville en fonction de l'interprétation recherchée (par exemple, représenter les habitations qui ont une vue sur un ou plusieurs bâtiments remarquables selon leurs loyers).

Nous avons ainsi proposé de nouveaux algorithmes mesurant la composition visuelle d'un paysage urbain en détectant tous les éléments de la ville qui s'y trouvent. Bien que long à générer lorsque la résolution est importante puisque l'on cherche à mesurer l'impact des éléments à plusieurs kilomètres, cette méthode permet d'analyser un point de vue en référençant les objets qui y sont visibles. Cela permet ensuite à des géographes, par exemple, de proposer des analyses de la composition de cette vue en fonction des éléments visibles. Cette composition peut se baser uniquement sur leurs types (bâtiment, végétation, etc.) mais également sur des caractéristiques provenant de données sémantiques externes qui décrivent les objets urbains (date de construction, usages, propriétaire ...).

Puisque l'ambiance visuelle est également liée à l'ensoleillement de la ville, et donc à l'ombre générée par les éléments qui s'y trouvent, nous avons également proposé une méthode de calcul de l'ensoleillement du territoire au cours d'une période temporelle. Elle cherche notamment à mesurer l'impact de chaque élément de la ville (l'ombre qu'il génère) sur les autres.

Cette étude d'ensoleillement ainsi que l'analyse de composition de la vue peuvent toutes deux servir à mesurer l'impact de projets d'urbanisation, et notamment à fournir des mesures permettant de comparer des versions concurrentes d'un tel projet via leurs influences respectives sur la visibilité et l'ensoleillement du territoire.

Tous nos travaux ont été réalisés au sein du logiciel 3D-Use développé par notre équipe. C'est un outil dont les sources sont libres qui a notamment pour vocation d'être mis à la disposition de la communauté, du LabEx IMU entre autres, afin de permettre à des chercheurs et des praticiens de diverses disciplines travaillant autour des modèles virtuels de villes de pouvoir utiliser nos algorithmes ou de développer les leurs.

5.2 Perspectives

Comme nous l'avons introduit précédemment, la reconstruction des modèles 3D de bâtiments sémantiquement enrichis par le cadastre est un sujet complexe nécessitant de prendre en compte de nombreux cas particuliers liés aux nombreuses différences présentes entre les deux jeux de données. Nous avons proposé une méthode automatique permettant de traiter efficacement la plupart des bâtiments mais il existe un certain nombre de cas particuliers pour lesquels le résultat est moins satisfaisant. Les discussions avec des experts ayant réalisé manuellement un tel procédé nous ont amené à vouloir proposer une méthode semi-automatique faisant intervenir leur expertise pour ces cas ambigus. Il serait possible d'aller plus loin en mettant en place un apprentissage automatique permettant de détecter certaines occurrences de cas nécessitant l'intervention d'un expert et les corrections qu'il propose afin de pouvoir par la suite les traiter automatiquement et ainsi réduire le nombre de ces interventions. Cet apprentissage permettrait également d'adapter le réglage des paramètres au jeu de données traité.

L'ajout de la végétation dans un modèle 3D de ville offre de nouvelles perspectives, comme par exemple sa prise en compte pour des études énergétiques. Des projets qui s'intéressent au changement climatique se développent afin de déterminer les moyens pouvant être mis en place dans le but d'adapter les villes à ces changements, comme le projet EPOC⁶² du LabEx IMU. La végétation occupe une place importante dans ce type d'étude, et grâce à sa présence dans le modèle 3D il serait envisageable de mesurer son impact énergétique sur un territoire urbain à grande échelle (par exemple pour diminuer la température ambiante).

Concernant les organisations d'un modèle virtuel 3D, la Semantic Bounding Volume Hierarchy évoluera naturellement avec les modèles qui deviendront toujours plus précis sémantiquement et topologiquement en s'éloignant ainsi d'une simple représentation géométrique, qui continuera également de progresser afin de proposer une représentation plus proche de la réalité. Il serait par contre envisageable de retravailler la notion d'îlots urbains, et notamment leur regroupement en niveaux hiérarchisés. Le réseau routier fournit un partitionnement satisfaisant du territoire, mais il ne suffit pas à structurer un territoire urbain. Le contenu des îlots générés par les routes devrait également intervenir dans le groupement de ceux-ci en îlots de niveau supérieur : par exemple si un îlot est constitué d'immeubles hauts

⁶² <http://imu.universite-lyon.fr/projet/epoc-etablissement-dune-politique-locale-dadaptation-au-changement-climatique-constitution-dun-observatoire-hors-murs/>

alors que son voisin est constitué principalement de terrain et de maisons, il peut paraître légitime de ne pas permettre leur fusion même si la route qui les sépare est jugée peu importante. Puisque cette structuration en îlots repose sur le principe de regrouper les éléments qui se ressemblent afin de proposer une vue simplifiée du territoire qui reste caractéristique de celui-ci, il serait en ce sens intéressant de définir des métriques permettant de quantifier le contenu des îlots et ainsi pouvoir mesurer la ressemblance entre ces derniers.

S'il manque encore de nombreux éléments dans les modèles 3D, leur ajout se fera probablement via l'acquisition de données terrestres puisque la structure urbaine, et notamment les arbres d'alignement, empêche de les obtenir par acquisition aérienne si ces éléments sont proches du sol (mobiliers urbains, signalisations, etc.). Ces flux de données terrestres permettraient par exemple de définir de meilleures textures pour les modèles 3D qui pourraient, entre autres, être exploitées dans le cadre de notre algorithme de détection de changements. Dans le même contexte, les méthodes de comparaison faisant intervenir des nuages de points gagneraient en pertinence avec des méthodes plus élaborées de reconstruction de géométrie 3D depuis ces nuages de points, telle que celle proposée par [LM12].

De manière plus générale, la modélisation des bâtiments reste à améliorer, notamment au niveau des toits (cheminées, gaines techniques, ...) qui vont représenter un sujet à enjeu en termes d'occupation pour les prochaines années.

De nombreuses problématiques sont en effet en cours d'émergence sur la réappropriation des toits dans les villes. Des organisations comme Groof⁶³ et Marmite Urbaine⁶⁴ cherchent notamment à mettre en place des potagers en toiture. La végétalisation des toits est un sujet qui prend de plus en plus d'importance dans un contexte écologique global (en plus de la possibilité de produire de la nourriture via une agriculture urbaine).

La première condition consistera à repérer les toits plats pouvant accueillir ce type de structure. Il est cependant nécessaire d'avoir ici une analyse précise, et un modèle en LoD 2 ne suffira pas à produire une liste exploitable de toits plats (car les modèles sont trop simplifiés vis-à-vis de la réalité). Il serait préférable de partir de données telles que des nuages de points aériens et/ou des orthophotographies permettant entre autres de mesurer les surfaces planes et dégagées des toitures ; les toits pourront également être modélisés plus fidèlement, afin de prendre place dans un modèle basé sur le LoD 3 par exemple. Ces espaces pourront

⁶³ <http://groof.fr/>

⁶⁴ <http://www.marmite-urbaine.com/>

aussi avoir d'autres affectations comme créer des parcs, des centres de jeu, des potagers, etc. Ces choix pourraient être effectués selon des indicateurs décrivant le toit et son environnement qui devront être croisés avec des données externes (type de construction, accès au toit, bâtiment public/privé, etc.). L'analyse de la visibilité, accessible depuis le toit, pourrait notamment être un facteur de décision : il serait par exemple potentiellement intéressant de créer un parc public sur un toit présentant un point de vue attrayant sur la ville, alors que des potagers privés pourraient se contenter de toits à la vue quelconque. Ces potagers nécessiteront par contre d'avoir une exposition au soleil particulière, tout comme des panneaux photovoltaïques ou des chauffe-eaux solaires.

Ces analyses de l'ambiance visuelle pourraient par ailleurs être complétées grâce à la prise en compte de la lumière artificielle présente en ville, ce qui nécessiterait de posséder des données sur les réverbères et autres éclairages publics. Celles-ci permettraient de fournir une nouvelle perspective à la notion d'ambiance visuelle puisque ces lumières artificielles ont également une influence sur la perception qu'ont les habitants de leur environnement urbain la nuit, notamment sur leur sentiment de sécurité ou d'insécurité par exemple.

Les corridors lumineux générés par ces éclairages publics pourraient également être pris en compte afin de déterminer leur impact sur les bâtiments, notamment sur les premiers étages qui peuvent être « pollués » par cette lumière potentiellement indésirable. Dans la logique inverse, il serait intéressant de mesurer l'impact des éléments de la ville sur cet éclairage, afin par exemple d'optimiser le positionnement des lampadaires. Là encore, la présence de la végétation dans le modèle 3D aura son importance puisqu'il est envisageable que des arbres situés en bords de route aient un impact important sur la lumière générée par les réverbères environnant.

Le développement de notre outil 3D-Use a été initié il y a quelques années dans le but de pouvoir regrouper facilement des traitements sur les modèles virtuels de la ville. Grâce à sa capacité à gérer les principaux standards de données liés à ce domaine, il permet de concevoir et développer facilement de nouveaux algorithmes et propose une visualisation 3D des données en entrée et des résultats générés.

Cependant, nous en sommes arrivés à la conclusion que l'utilisation de ce logiciel atteignait aujourd'hui ses limites par rapport aux possibilités offertes par des outils web. En effet, de nombreuses personnes n'ont pas forcément la possibilité d'installer facilement ce type de logiciel sur leurs machines. De plus, la puissance de celles-ci ont un impact important sur les

temps de calcul et sur la visualisation de données 3D, ce qui pouvait rapidement être rédhibitoire pour les machines peu performantes.

Grâce aux travaux portés par la thèse de Jérémy Gaillard⁶⁵ qui consistent à développer un outil web basé notamment sur iTowns⁶⁶ pour le côté client, nous prévoyons la mise en place d'un service permettant d'accéder à des traitements depuis un serveur. Il serait ainsi possible d'envoyer les modèles stockées dans une base de données à ce serveur qui réaliserait les traitements demandés et qui retourneraient les résultats à l'utilisateur. La visualisation des modèles et des résultats pourraient ensuite se faire directement sur cet outil, avec des performances ne dépendant pas de la machine utilisée.

⁶⁵ <http://www.itowns-project.org/>

⁶⁶ <https://liris.cnrs.fr/membres?idn=jgaillar>

Annexe 1 : Génération des emprises au sol

Nous présentons ici la méthode utilisée afin de générer des emprises au sol de bâtiments modélisés en 3D selon le LoD 2 du standard CityGML. Un modèle de bâtiment 3D défini selon ce niveau de détail est constitué de polygones de murs et de toits, mais sa géométrie est définie entièrement par ceux du toit. En effet, les murs représentent uniquement des plans verticaux qui prolongent jusqu'au sol (ou jusqu'au prochain polygone de toit) les bordures du toit. L'emprise au sol que nous recherchons correspond donc à l'enveloppe extérieure des polygones de toit, et ceux du mur ne seront pas utilisés.

Pour chaque bâtiment modélisé en 3D (Figure 119, en haut à gauche) Nous extrayons la liste des polygones du toit (en haut à droite), et nous les projetons sur un plan horizontal quelconque en leur retirant leur coordonnée Z (en bas à droite). Nous obtenons alors un ensemble de polygones dont l'enveloppe extérieure représente l'emprise au sol qui nous intéresse (en bas à gauche).

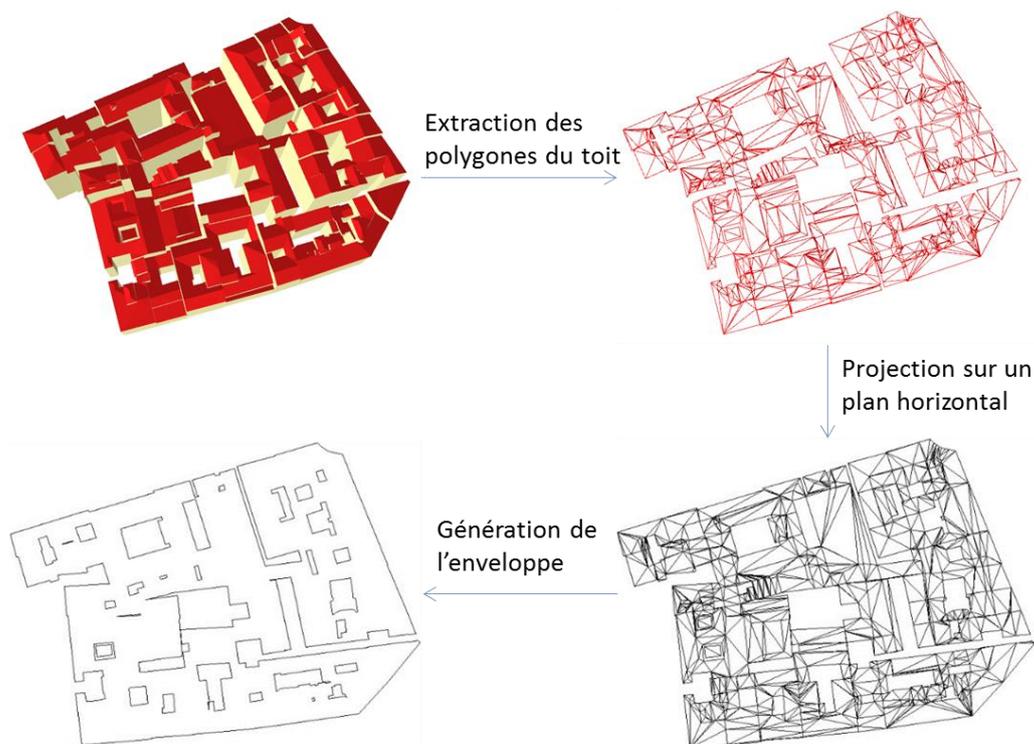


Figure 119: Etapes de génération de l'emprise au sol d'un bâtiment CityGML en LoD 2.

En théorie, cette génération ne pose pas de problème particulier, mais en pratique il y a des petites erreurs dues à la manipulation des données vectorielles. En effet, en positionnant tous les polygones du toit sur le même plan horizontal, nous mettons côte à côte des polygones qui étaient potentiellement distants en 3D (car séparés par un mur vertical). Cela donne donc des cas similaires à celui illustré dans la Figure 120, où un point appartenant à un polygone 2D n'existe pas forcément sur le polygone voisin. A gauche de cette figure, nous avons trois polygones A, B et C qui sont voisins en 2D mais C était initialement séparé des deux autres par un mur en 3D. Le point vert, correspondant au point d'intersection théorique entre les trois polygones, n'existent réellement que sur A et B, et en zoomant à cet endroit nous pouvons constater un trou à cet endroit-là entre A et B d'un côté et C de l'autre (à droite). En effet, les données étant vectorielles, le point appartenant à C censé être à cet endroit aura peut-être des coordonnées légèrement différentes en fonction de la méthode d'interpolation des coordonnées entre deux points. Cette différence est visuellement imperceptible mais pose problème dans la gestion de ces polygones.

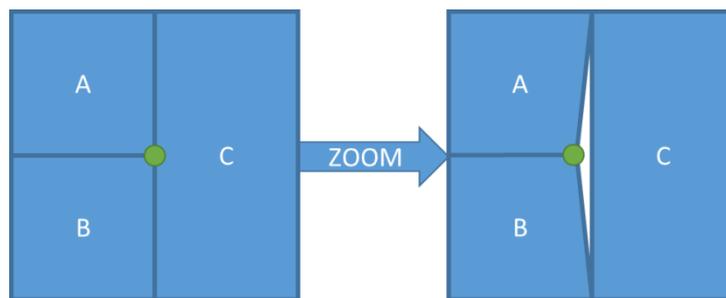


Figure 120: A, B et C sont trois polygones voisins dans l'emprise au sol générée d'un bâtiment 3D. C était séparé des deux autres par un mur dans le modèle 3D. En zoomant sur le point d'intersection vert supposé entre ces trois polygones, nous donc constatons un trou dû aux imprécisions des données vectorielles représentant les polygones.

Ainsi, en essayant d'unir ces polygones, nous n'obtiendrons pas le carré plein recouvrant les surfaces de A, B et C. Un trou sera présent dans ce carré et celui-ci qui peut grandement compliquer son utilisation. De même pour un calcul d'intersection entre A ou B et C, nous n'obtiendrons pas les arêtes communes aux polygones, nous obtiendrons seulement les points communs.

Pour corriger ceci, nous parcourons chaque point des polygones de l'emprise au sol et nous vérifions que ce point existe sur les polygones voisins. Si ce n'est pas le cas, nous le créons en divisant en deux l'arrête concernée de ce polygone voisin afin d'intégrer ce point.

Annexe 2 : Calcul de la distance de Hausdorff

Soit deux maillages triangulaires A et B , nous souhaitons mesurer la distance de Hausdorff les séparant. Notre implémentation du calcul de la distance de Hausdorff se base sur le travail de [Jon95].

Soit $Dh(A, B)$ la distance de Hausdorff entre les maillages A et B définie par :

$$Dh(A, B) = \max(\delta(A, B), \delta(B, A))$$

Où

$$\delta(A, B) = \sup_{a \in A} \inf_{b \in B} d(a, b)$$

Nous allons ici nous intéresser uniquement au calcul de $\delta(A, B)$, mais le calcul de $\delta(B, A)$ est équivalent et il suffit ensuite de prendre la plus grande valeur des deux.

Le maillage A n'est ici pas vu comme un ensemble de triangles, mais comme l'ensemble des points formant ces triangles. Chaque élément a appartenant à A correspond donc à l'un de ces points. B est lui bien vu comme un ensemble de triangles b .

Cette formule signifie que calculer la distance δ de A vers B revient à trouver pour chaque point a de A le triangle b de B le plus proche, d'en calculer la distance puis de sélectionner la distance la plus grande parmi tous ces couples points – triangles.

Nous allons présenter la méthode utilisée afin de calculer cette distance d correspondant à la distance entre un point et un triangle dans un espace 3D. Pour un point a donné, nous prenons sa plus petite distance d parmi tous les triangles de B . Une fois cette distance calculée pour chaque point de A , il suffira d'en prendre la valeur la plus grande pour obtenir $\delta(A, B)$.

Soit un point P_0 et un triangle T composé des trois points P_1 , P_2 et P_3 . Nous souhaitons calculer la distance de P_0 à T , ou $d(P_0, T)$. Pour cela, il nous faut trouver le point P_0' qui est le projeté orthogonal de P_0 sur le plan formé par le triangle T (Figure 121).

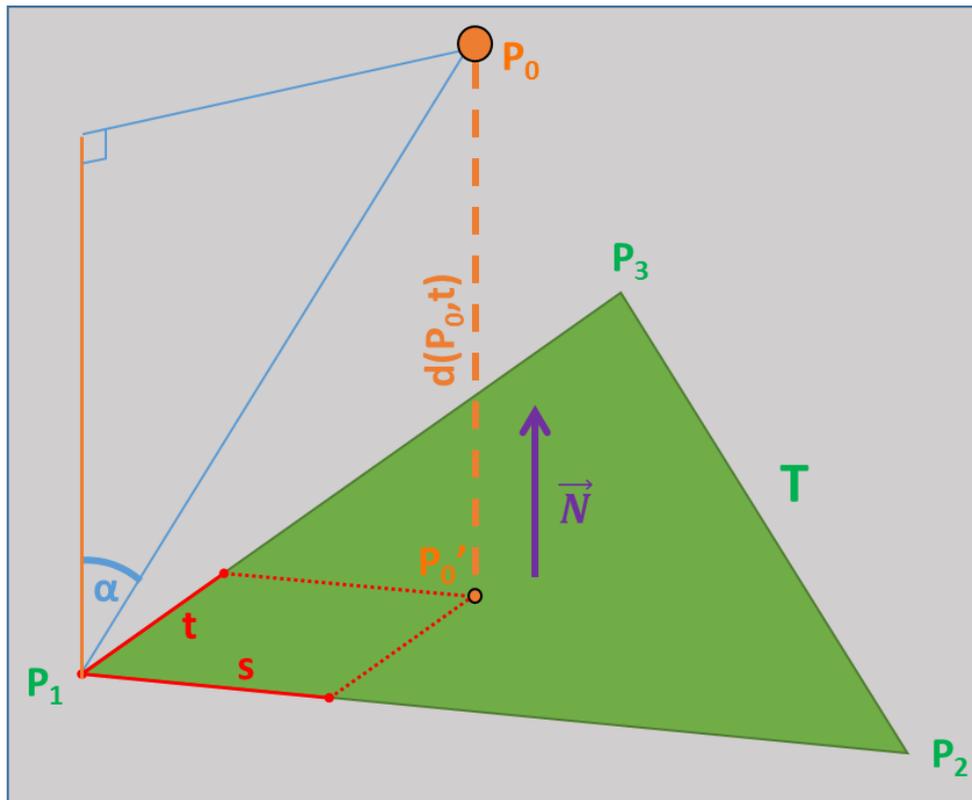


Figure 121: Calcul de $d(P_0, T)$ dans un cas simple.

Nous commençons par calculer la normale \vec{N} de T qui va porter le vecteur $\overrightarrow{P_0'P_0}$:

$$\vec{N} = \overrightarrow{P_1P_2} \wedge \overrightarrow{P_1P_3}$$

Vient ensuite le calcul du cosinus de l'angle α formé par $\overrightarrow{P_0'P_0}$ (donc \vec{N}) et $\overrightarrow{P_1P_0}$:

$$\cos \alpha = \frac{\overrightarrow{P_1P_0} \cdot \vec{N}}{\|\overrightarrow{P_1P_0}\| \|\vec{N}\|}$$

Nous pouvons alors déterminer :

$$\|\overrightarrow{P_0'P_0}\| = \|\overrightarrow{P_1P_0}\| \cos \alpha$$

D'où :

$$\overrightarrow{P_0'P_0} = -\|\overrightarrow{P_0'P_0}\| \frac{\vec{N}}{\|\vec{N}\|}$$

Et :

$$P_0' = P_0 + \overrightarrow{P_0'P_0}$$

Maintenant que nous avons la position du projeté P_0' de P_0 sur le plan formé par le triangle T , il faut regarder s'il est à l'intérieur ou à l'extérieur de ce triangle. S'il est à l'intérieur, la valeur de $d(P_0, T)$ recherchée correspondra simplement à la norme $\|\overrightarrow{P_0'P_0}\|$, sinon il restera à la calculer.

Afin de déterminer la position de P_0' par rapport à T , nous calculons ses coordonnées paramétriques (s,t) par rapport au repère défini par $P_1, \overrightarrow{P_1P_2}$ et $\overrightarrow{P_1P_3}$. Ces coordonnées doivent donc vérifier :

$$P_0' = P_1 + s \overrightarrow{P_1P_2} + t \overrightarrow{P_1P_3}$$

Ce qui revient à résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} P_0'_x = P_{1x} + s * \overrightarrow{P_1P_2}_x + t * \overrightarrow{P_1P_3}_x \\ P_0'_y = P_{1y} + s * \overrightarrow{P_1P_2}_y + t * \overrightarrow{P_1P_3}_y \end{cases}$$

Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} t = \frac{P_{1y} * \overrightarrow{P_1P_2}_x - P_{1x} * \overrightarrow{P_1P_2}_y + P_0'_x * \overrightarrow{P_1P_2}_y - P_0'_y * \overrightarrow{P_1P_2}_x}{\overrightarrow{P_1P_2}_y * \overrightarrow{P_1P_3}_x - \overrightarrow{P_1P_2}_x * \overrightarrow{P_1P_3}_y} \\ s = \frac{P_0'_x - P_{1x} - t * \overrightarrow{P_1P_3}_x}{\overrightarrow{P_1P_2}_x} \end{cases}$$

Si $t \geq 0$ et $s \geq 0$ et $s + t \leq 1$ alors P_0' est dans le triangle T et :

$$d(P_0, T) = \|\overrightarrow{P_0'P_0}\|$$

Sinon, il faut projeter orthogonalement P_0' sur T pour obtenir le point appartenant à T le plus proche du point P_0 initial. Nous projetons pour cela le point P_0' sur chacune des trois arêtes de T et nous prenons la distance la plus petite parmi les trois calculées. Nous expliquons ici le fonctionnement pour une seule arête (P_1P_3 , voir Figure 122) et ces calculs seront donc à répéter pour les deux autres afin d'en sélectionner la valeur minimale.

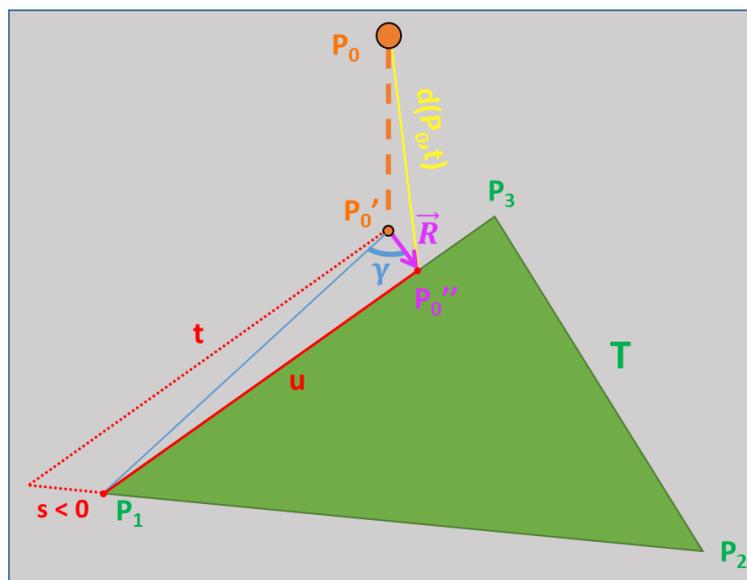


Figure 122: Calcul de $d(P_0, T)$ dans un cas plus compliqué.

Nous commençons par calculer la direction \vec{R} de cette projection orthogonale avec :

$$\vec{R} = (\overrightarrow{P_0'P_3} \wedge \overrightarrow{P_0'P_1}) \wedge \overrightarrow{P_1P_3}$$

Puis le cosinus de γ correspondant à l'angle entre \vec{R} (ou $\overrightarrow{P_0'P_0''}$) et $\overrightarrow{P_0'P_1}$:

$$\cos \gamma = \frac{\overrightarrow{P_0'P_1} \cdot \vec{R}}{\|\overrightarrow{P_0'P_1}\| \|\vec{R}\|}$$

On en déduit alors :

$$\|\overrightarrow{P_0'P_0''}\| = \|\overrightarrow{P_0'P_1}\| \cos \gamma$$

Et :

$$\overrightarrow{P_0'P_0''} = \|\overrightarrow{P_0'P_0''}\| \frac{\vec{R}}{\|\vec{R}\|}$$

Soit :

$$P_0'' = P_0' + \overrightarrow{P_0'P_0''}$$

La position relative u de P_0'' sur $\overrightarrow{P_1P_3}$ est alors définie par :

$$u = \frac{P_0''x - P_1x}{P_3x - P_1x}$$

Si $0 \leq u \leq 1$, alors P_0'' est entre P_1 et P_3 , donc :

$$d(P_0, T) = \sqrt{(\|\overrightarrow{P_0'P_0''}\|^2 + \|\overrightarrow{P_0'P_1}\|^2)}$$

Si $u < 0$ alors P_0 est plus proche de P_1 , donc :

$$d(P_0, T) = \|\overrightarrow{P_0P_1}\|$$

Si $u > 1$ alors P_0 est plus proche de P_3 , donc :

$$d(P_0, T) = \|\overrightarrow{P_0P_3}\|$$

Annexe 3 : Typer le modèle numérique de terrain

Le terrain présent dans un modèle de ville 3D est souvent peu détaillé en termes de sémantique. La notion de « terrain » peut représenter tout type de surface (terre, pelouse, route, etc.) or il pourrait être utile de pouvoir les différencier, d'autant plus que les standards comme le CityGML permettent de le faire.

Cette volonté de typer le terrain peut cependant difficilement s'effectuer lors de la création du modèle 3D puisque cela nécessiterait une caractérisation très efficace des données acquises. Cependant, des jeux de données externes existent déjà afin de modéliser l'occupation des sols en caractérisant la surface d'un territoire selon différentes catégories. Certains éléments comme les réseaux de transport sont également référencés dans de nombreux jeux de données.

Nous désirons utiliser ces données externes afin de typer un modèle numérique de terrain en classant sa géométrie selon différents types de surface. En considérant que le MNT est constitué d'un ensemble de triangles 3D sans superpositions revenant à une représentation 2.5D (c'est-à-dire que pour une coordonnée (x, y) donné, il ne peut exister qu'un seul triangle qui définira le z correspondant), cela consiste simplement à découper ces triangles selon des polygones 2D définissant les différents types de surface et de définir les polygones ainsi obtenus (qu'il faut re-trianguler) selon le type correspondant. Nous ne cherchons pas à corriger la géométrie 3D du terrain en fonction de ces données, nous améliorons seulement sa sémantique en proposant un typage de son territoire.

Nous avons notamment appliqué ceci sur deux types de données : les zones recouvertes d'herbes ou de végétations basses, et le réseau routier.

Les zones d'herbes sont détectées grâce à une méthode similaire à celle employée pour détecter les zones de végétation 3D précédemment présentée dans la section 3.1.2. Parmi les points non sélectionnés pour représenter la végétation haute précédente, nous conservons ceux n'ayant qu'un seul retour (significatif d'une surface dure) et étant détecté dans le canal infrarouge de l'orthophotographie comme représentant de la végétation. Une telle combinaison signifie que la zone concernée est probablement recouverte d'herbes ou de

végétations basses. Une fois ces points isolés, nous en générons des emprises polygonales 2D à l'aide de fermetures morphologiques qui regroupent les points proches dans un polygone qui les contient. La Figure 123 montre le résultat obtenu sur une surface carrée de 2km par 2km dont les zones de végétation basses ont été détectées automatiquement par notre méthode grâce à des données acquises en 2015, que l'on a pu comparer avec un jeu de données de 2009 correspondant aux zones détectées manuellement par un opérateur de la Métropole de Lyon.

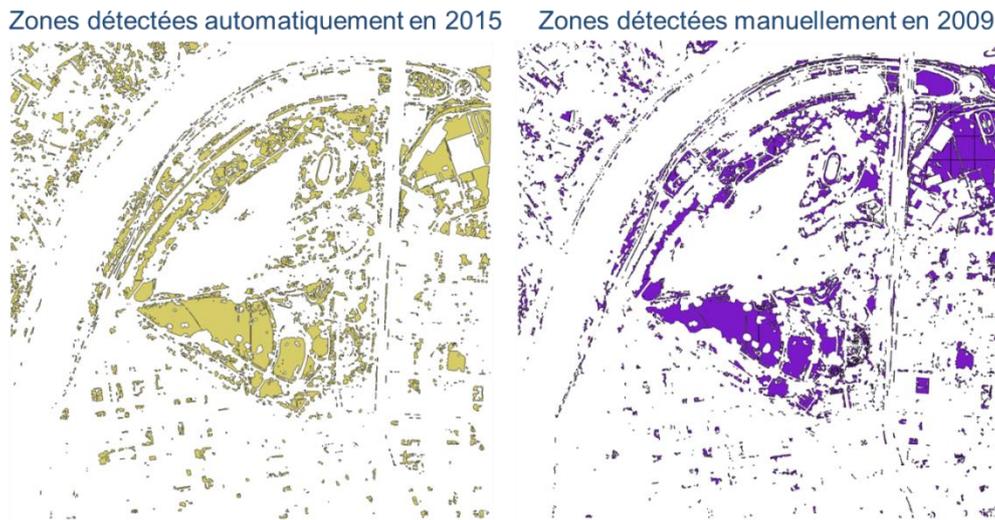


Figure 123: Comparaison entre les zones de végétations basses détectées par notre méthodes sur des données de 2015 (à gauche) et celles détectées manuellement en 2009 (à droite).

Les principales erreurs relevées concernent les zones recouvertes de végétation dense car aucun point du LiDAR ne parvient alors jusqu'au sol et les points obtenus ne correspondent donc qu'à la végétation haute située au-dessus du terrain recherché. Ce type de problème nécessiterait une vérification terrestre puisque les données aériennes seront toujours obstruées par la végétation haute, à moins d'acquérir les données lors d'une saison où certains arbres perdent leurs feuilles.

Afin de représenter également les routes sur le MNT, nous exploitons une base de données vectorielle 2D représentant le réseau routier par des lignes. Il est notamment possible d'obtenir de telles données depuis la plateforme communautaire OpenStreetMap. Grâce à une information de largeur contenue dans chaque ligne de route, il est possible de générer des polygones correspondant aux routes et ainsi mettre en place la découpe des triangles du MNT afin de créer la géométrie correspondant aux routes.

Cette découpe du terrain pourrait s'appliquer à de nombreux autres jeux de données, notamment aux orthophotographies qui peuvent être segmentées grâce à des méthodes de classification automatique, comme celles de [KSF05] ou [ZCP12]. Cela permet d'enrichir à moindre coût la représentation du terrain d'un modèle 3D de ville.

Bibliographie

- [ACZO12] N Alama, V Coors, S Zlatanova, and P van Oosterom. *Shadow effect on photovoltaic potentiality analysis using 3D city models*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2012.
- [ACZO16] N Alama, V Coors, S Zlatanova, and PJM Oosterom. Resolution in photovoltaic potential computation. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 89–96, 2016.
- [AEH+08] H Arefi, J Engels, M Hahn, et al. Levels of detail in 3d building reconstruction from lidar data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B3b*, 2008.
- [AF13] Mohammad Awrangjeb and Clive S Fraser. Rule-based segmentation of lidar point cloud for automatic extraction of building roof planes. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 2(3/W1):1–6, 2013.
- [AF14] Mohammad Awrangjeb and Clive S Fraser. An automatic and threshold-free performance evaluation system for building extraction techniques from airborne lidar data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(10):4184–4198, 2014.
- [AFS+11] Sameer Agarwal, Yasutaka Furukawa, Noah Snavely, Ian Simon, Brian Curless, Steven M Seitz, and Richard Szeliski. Building rome in a day. *Communications of the ACM*, 54(10):105–112, 2011.
- [Agu14] G Agugiaro. From sub-optimal datasets to a citygml-compliant 3d city model: experiences from trento, italy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(4):7, 2014.
- [AM15] Manuel Appert and Christian Montes. Skyscrapers and the redrawing of the london skyline: a case of territorialisation through landscape control. *Articulo-Journal of Urban Research*, (Special issue 7), 2015.

- [App08] Manuel Appert. Ville globale versus ville patrimoniale ? Des tensions entre libéralisation de la skyline de Londres et préservation des vues historiques. *Revue Géographique de l'Est*, 48(1-2), 2008.
- [BCE+00] Michael Batty, David Chapman, Steve Evans, Mordechai Haklay, Stefan Kueppers, Naru Shioda, Andy Smith, and Paul M Torrens. Visualizing the city: communicating urban design to planners and decision-makers. 2000.
- [Ben79] Michael L Benedikt. To take hold of space: isovists and isovist fields. *Environment and Planning B: Planning and design*, 6(1):47–65, 1979.
- [BGR01] Michael J Brown, Sue Grimmond, and Carlo Ratti. Comparison of methodologies for computing sky view factor in urban environments. In *International Society of Environmental Hydraulics Conference, Tempe, AZ*, 2001.
- [BLG00] Houman Borouchaki, Patrick Laug, and Paul-Louis George. Parametric surface meshing using a combined advancing-front generalized delaunay approach. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 49(1-2):233–259, 2000.
- [BLS15] Filip Biljecki, Hugo Ledoux, and Jantien Stoter. Improving the consistency of multi-lod citygml datasets by removing redundancy. In *3D geoinformation science*, pages 1–17. Springer, 2015.
- [BLS16a] F Biljecki, H Ledoux, and J Stoter. Generation of multi-lod 3d city models in citygml with the procedural modelling engine random3dcity. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pages 51–59, 2016.
- [BLS16b] Filip Biljecki, Hugo Ledoux, and Jantien Stoter. An improved lod specification for 3d building models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 59:25–37, 2016.
- [BLS17] Filip Biljecki, Hugo Ledoux, and Jantien Stoter. Does a finer level of detail of a 3d city model bring an improvement for estimating shadows? In *Advances in 3D Geoinformation*, pages 31–47. Springer, 2017.
- [BLSV16] Filip Biljecki, Hugo Ledoux, Jantien Stoter, and George Vosselman. The variants of an lod of a 3d building model and their influence on spatial analyses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116:42–54, 2016.

- [BNK10] Thomas Becker, Claus Nagel, and Thomas H Kolbe. Utilitynetworkade-core model. *Draft version. Online available at http://www.citygmlwiki.org/index.php/CityGML_UtilityNetworkADE, last access, 7(5):2010, 2010.*
- [BRKM10] Phil Bartie, Femke Reitsma, Simon Kingham, and Steven Mills. Advancing visibility modelling algorithms for urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34(6):518–531, 2010.
- [BSL+15] Filip Biljecki, Jantien Stoter, Hugo Ledoux, Sisi Zlatanova, and Arzu Çöltekin. Applications of 3d city models: State of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4):2842–2889, 2015.
- [Buc11] Alexander Klaus Bucksch. *Revealing the skeleton from imperfect point clouds*. PhD thesis, TU Delft, Delft University of Technology, 2011.
- [BvACN13] Madhurima Bandyopadhyay, Jan AN van Aardt, and Kerry Cawse-Nicholson. Classification and extraction of trees and buildings from urban scenes using discrete return lidar and aerial color imagery. In *SPIE Defense, Security, and Sensing*, pages 873105–873105. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [BZ99] Caroline Baillard and Andrew Zisserman. Automatic reconstruction of piecewise planar models from multiple views. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on.*, volume 2, pages 559–565. IEEE, 1999.
- [CAM+14] Farhana Murtaza Choudhury, Mohammed Eunos Ali, Sarah Masud, Suman Nath, and Ishat E Rabban. Scalable visibility color map construction in spatial databases. *Information Systems*, 42:89–106, 2014.
- [CBZ+08] Remco Chang, Thomas Butkiewicz, Caroline Ziemkiewicz, Zachary Wartell, Nancy Pollard, and William Ribarsky. Legible simplification of textured urban models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(3), 2008.
- [CCG+06] P Calcagno, G Courrioux, A Guillen, D Fitzgerald, and P McInerney. How 3d implicit geometric modelling helps to understand geology: the 3dgeomodeller methodology. In *XIth International Congress, Society for Mathematical Geology*, 2006.

- [CENCP12] Cindy Cappelle, Maan E El Najjar, François Charpillet, and Denis Pomorski. Virtual 3d city model for navigation in urban areas. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 66(3):377–399, 2012.
- [CF01] Richard J Campbell and Patrick J Flynn. A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, 81(2):166–210, 2001.
- [Cha06] Kang-Tsung Chang. *Geographic information system*. Wiley Online Library, 2006.
- [Cha07] Nicolas Champion. 2d building change detection from high resolution aerial images and correlation digital surface models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3/W49A):197–202, 2007.
- [CHL+09] Jun Chen, Yungang Hu, Zhilin Li, Renliang Zhao, and Liqiu Meng. Selective omission of road features based on mesh density for automatic map generalization. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8):1013–1032, 2009.
- [CLL+13] Massimiliano Corsini, Mohamed-Chaker Larabi, Guillaume Lavoué, Oldrich Petrík, Libor Váša, and Kai Wang. Perceptual metrics for static and dynamic triangle meshes. In *Computer Graphics Forum*, volume 32, pages 101–125. Wiley Online Library, 2013.
- [CMDG03] DR Caldwell, MJ Mineter, S Dowers, and BM Gittings. Analysis and visualization of visibility surfaces. In *Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation*, <http://www.geocomputation.org/2003/>, University of Southampton, UK, 2003.
- [CRM+09] Nicolas Champion, Franz Rottensteiner, Leena Matikainen, X Liang, J Hyypä, and BP Olsen. A test of automatic building change detection approaches. *Proceedings of CMRT09*, pages 03–04, 2009.
- [CRS98] Paolo Cignoni, Claudio Rocchini, and Roberto Scopigno. Metro: Measuring error on simplified surfaces. In *Computer Graphics Forum*, volume 17, pages 167–174. Wiley Online Library, 1998.

- [CSG+17] Kanishk Chaturvedi, Carl Stephen Smyth, Gilles Gesquière, Tatjana Kutzner, and Thomas H Kolbe. Managing versions and history within semantic 3d city models for the next generation of citygml. In *Advances in 3D Geoinformation*, pages 191–206. Springer, 2017.
- [CTWL14] Liang Cheng, Lihua Tong, Yu Wang, and Manchun Li. Extraction of urban power lines from vehicle-borne lidar data. *Remote Sensing*, 6(4):3302–3320, 2014.
- [CWSC14] Liang-Chien Chen, Chia-Hao Wu, Tzu-Sheng Shen, and Chien-Cheng Chou. The application of geometric network models and building information models in geospatial environments for fire-fighting simulations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45:1–12, 2014.
- [DDSGCC11] Eloy Dáz-Dorado, Andrés Suárez-Garcá, Camilo J Carrillo, and José Cidrás. Optimal distribution for photovoltaic solar trackers to minimize power losses caused by shadows. *Renewable Energy*, 36(6):1826–1835, 2011.
- [DNM09] Maria Danese, Gabriele Nolè, and Beniamino Murgante. Visual impact assessment in urban planning. *Geocomputation and Urban Planning*, pages 133–146, 2009.
- [DP08] Peter Dorninger and Norbert Pfeifer. A comprehensive automated 3d approach for building extraction, reconstruction, and regularization from airborne laser scanning point clouds. *Sensors*, 8(11):7323–7343, 2008.
- [DT06] Mélanie Durupt and Franck Taillandier. Automatic building reconstruction from a digital elevation model and cadastral data: an operational approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(3):142–147, 2006.
- [Ebe05] David Eberly. The minimal cycle basis for a planar graph. *Geometric Tools, Inc*, 2005.
- [ESR98] ESRI ESRI. Shapefile technical description. esri. *INC*, <http://www.esri.com>, 1998.
- [FCRB15] Sara Freitas, C Catita, Paula Redweik, and Miguel Centeno Brito. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:915–931, 2015.

- [FMJ09] Hongchao Fan, Liqiu Meng, and Mathias Jahnke. Generalization of 3d buildings modelled by citygml. In *Advances in GIScience*, pages 387–405. Springer, 2009.
- [FZ03] Christian Frueh and Avidesh Zakhor. Constructing 3d city models by merging ground-based and airborne views. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Computer Society Conference on*, volume 2, pages II–562. IEEE, 2003.
- [Gas09] Gunter Gassner. Elevations, icons and lines: The city abstracted through its skylines. *Davis, J.; Dean, C.; Gassner, G.; Hall, S*, pages 67–86, 2009.
- [GD09] Tassilo Glander and Jürgen Döllner. Abstract representations for interactive visualization of virtual 3d city models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(5):375–387, 2009.
- [GKCN08] Gerhard Gröger, Thomas H Kolbe, Angela Czerwinski, and Claus Nagel. Opendgis city geography markup language (citygml) encoding standard. *Open Geospatial Consortium Inc*, pages 1–234, 2008.
- [GKNH12] G Gröger, TH Kolbe, C Nagel, and KH Häfele. Ogc city geography markup language (citygml) encoding standard, version 2.0, ogc doc no. 12-019. *Open Geospatial Consortium*, 2012.
- [Gla89] Andrew S Glassner. An introduction to ray tracing. Elsevier, 1989.
- [GLM96] Stefan Gottschalk, Ming C Lin, and Dinesh Manocha. Obbtrees: A hierarchical structure for rapid interference detection. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 171–180. ACM, 1996.
- [GP12] Gerhard Gröger and Lutz Plümer. Citygml–interoperable semantic 3d city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71:12–33, 2012.
- [HDSP10] Karim Hammoudi, Fadi Dornaika, Bahman Soheilian, and Nicolas Papanoditis. Extracting wire-frame models of street facades from 3d point clouds and the corresponding cadastral map. *IAPRS*, 38(Part 3A):91–96, 2010.
- [He12] Shuang He. *Production Et Visualisation de Niveaux de Détail Pour Les Modèles 3D Urbains*. PhD thesis, 2012.

- [HGA04] Julio Hernández, Lorenzo Garca, and Francisco Ayuga. Assessment of the visual impact made on the landscape by new buildings: a methodology for site selection. *Landscape and Urban Planning*, 68(1):15–28, 2004.
- [HK10] Norbert Haala and Martin Kada. An update on automatic 3d building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6):570–580, 2010.
- [HKF04] Ch Hug, P Krzystek, and W Fuchs. Advanced lidar data processing with lastools. In *XXth ISPRS Congress*, pages 12–23, 2004.
- [Hop98] Hugues Hoppe. Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering. In *Visualization'98. Proceedings*, pages 35–42. IEEE, 1998.
- [HR01] John P Huelsenbeck and Fredrik Ronquist. Mrbayes: Bayesian inference of phylogenetic trees. *Bioinformatics*, 17(8):754–755, 2001.
- [HZ12] Jaroslav Hofierka and Marian Zlocha. A new 3-d solar radiation model for 3-d city models. *Transactions in GIS*, 16(5):681–690, 2012.
- [IBC08] Corina Iovan, Didier Boldo, and Matthieu Cord. Detection, characterization, and modeling vegetation in urban areas from high-resolution aerial imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(3):206–213, 2008.
- [ICG+14] Corina Iovan, Paul-Henry Cournède, Thomas Guyard, Benot Bayol, Didier Boldo, and Matthieu Cord. Model-based analysis–synthesis for realistic tree reconstruction and growth simulation. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 52(2):1438–1450, 2014.
- [JLTC15] Mark S Johnson, Michael J Lathuillière, Thoreau R Tooke, and Nicholas C Coops. Attenuation of urban agricultural production potential and crop water footprint due to shading from buildings and trees. *Environmental Research Letters*, 10(6):064007, 2015.
- [Jon95] Mark W Jones. 3d distance from a point to a triangle. *Department of Computer Science, University of Wales Swansea Technical Report CSR-5*, 1995.

- [JRH03] Christopher Jaynes, Edward Riseman, and Allen Hanson. Recognition and reconstruction of buildings from multiple aerial images. *Computer Vision and Image Understanding*, 90(1):68–98, 2003.
- [JSK09] Y Jwa, G Sohn, and HB Kim. Automatic 3d powerline reconstruction using airborne lidar data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens*, 38(Part 3):W8, 2009.
- [KAC07] Anestis Koutsoudis, Fotis Arnaoutoglou, and Christodoulos Chamzas. On 3d reconstruction of the old city of xanthi. a minimum budget approach to virtual touring based on photogrammetry. *Journal of Cultural Heritage*, 8(1):26–31, 2007.
- [Kad06] Martin Kada. 3d building generalization based on half-space modeling. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(2):58–64, 2006.
- [KB04] Leif Kobbelt and Mario Botsch. A survey of point-based techniques in computer graphics. *Computers & Graphics*, 28(6):801–814, 2004.
- [KBC15] Thomas H Kolbe, Barbara Burger, and Berit Cantzler. Citygml goes to broadway. In *Photogrammetric Week*, volume 15, pages 343–356, 2015.
- [KGP05] Thomas H Kolbe, Gerhard Gröger, and Lutz Plümer. Citygml: Interoperable access to 3d city models. In *Geo-information for disaster management*, pages 883–899. Springer, 2005.
- [KHM+98] James T Klosowski, Martin Held, Joseph SB Mitchell, Henry Sowizral, and Karel Zikan. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-dops. *IEEE transactions on Visualization and Computer Graphics*, 4(1):21–36, 1998.
- [KK86] Timothy L Kay and James T Kajiya. Ray tracing complex scenes. In *ACM SIGGRAPH computer graphics*, volume 20, pages 269–278. ACM, 1986.
- [KN04] ZuWhan Kim and Ramakant Nevatia. Automatic description of complex buildings from multiple images. *Computer Vision and Image Understanding*, 96(1):60–95, 2004.
- [Kol09] Thomas H Kolbe. Representing and exchanging 3d city models with citygml. In *3D geo-information sciences*, pages 15–31. Springer, 2009.
- [KSF05] Florian P Kressler, Klaus Steinnocher, and Michael Franzen. Object-oriented classification of orthophotos to support update of spatial databases. In

Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. Proceedings. 2005 IEEE International, volume 1, pages 4–pp. IEEE, 2005.

[KVH84] James T Kajiya and Brian P Von Herzen. Ray tracing volume densities. In *ACM Siggraph Computer Graphics*, volume 18, pages 165–174. ACM, 1984.

[KZD12] Serkan Kemec, Sisi Zlatanova, and Sebnem Duzgun. *A new LoD definition hierarchy for 3D city models used for natural disaster risk communication tool*. International Cartographic Association, 2012.

[LCO11] Thomas Leduc, Françoise Chaillou, and Thomas Ouard. Towards a “typification” of the pedestrian surrounding space: Analysis of the isovist using digital processing method. In *Advancing Geoinformation Science for a Changing World*, pages 275–292. Springer, 2011.

[Lev90] Marc Levoy. Efficient ray tracing of volume data. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 9(3):245–261, 1990.

[LGH+03] Don Leckie, François Gougeon, David Hill, Rick Quinn, Lynne Armstrong, and Roger Shreenan. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5):633–649, 2003.

[LHN00] Sung Chun Lee, Andres Huertas, and Ramakant Nevatia. Modeling 3-d complex buildings with user assistance. In *Applications of Computer Vision, 2000, Fifth IEEE Workshop on.*, pages 170–177. IEEE, 2000.

[LJN02a] Sung Chun Lee, Soon Ki Jung, and Ram Nevatia. Automatic integration of facade textures into 3d building models with a projective geometry based line clustering. In *Computer Graphics Forum*, volume 21, pages 511–519. Wiley Online Library, 2002.

[LJN02b] Sung Chun Lee, Soon Ki Jung, and Ramakant Nevatia. Automatic pose estimation of complex 3d building models. In *Applications of Computer Vision, 2002.(WACV 2002). Proceedings. Sixth IEEE Workshop on*, pages 148–152. IEEE, 2002.

[LJN02c] Sung Chun Lee, Soon Ki Jung, and Ramakant Nevatia. Integrating ground and aerial views for urban site modeling. In *Pattern Recognition, 2002*.

Proceedings. 16th International Conference on, volume 4, pages 107–112. IEEE, 2002.

[Llo03] Marcos Llobera. Extending gis-based visual analysis: the concept of visualscapes. *International journal of geographical information science*, 17(1):25–48, 2003.

[LM12] Florent Lafarge and Clement Mallet. Creating large-scale city models from 3D-point clouds: a robust approach with hybrid representation. *International Journal of Computer Vision*, 99(1):69–85, 2012.

[LMF+07] PG Loutzenhiser, H Manz, C Felsmann, PA Strachan, Th Frank, and GM Maxwell. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*, 81(2):254–267, 2007.

[LP02] Peter Lindstrom and Valerio Pascucci. Terrain simplification simplified: A general framework for view-dependent out-of-core visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer graphics*, 8(3):239–254, 2002.

[LT97] Kok-Lim Low and Tiow-Seng Tan. Model simplification using vertex-clustering. In *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*, pages 75–ff. ACM, 1997.

[Lue03] David P Luebke. *Level of detail for 3D graphics*. Morgan Kaufmann, 2003.

[LW02] Matthew Luck and Jianguo Wu. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the phoenix metropolitan region, arizona, usa. *Landscape ecology*, 17(4):327–339, 2002.

[LW04] Dengsheng Lu and Qihao Weng. Spectral mixture analysis of the urban landscape in indianapolis with landsat etm+ imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(9):1053–1062, 2004.

[LZ12] Zhilin Li and Qi Zhou. Integration of linear and areal hierarchies for continuous multi-scale representation of road networks. *International Journal of Geographical Information Science*, 26(5):855–880, 2012.

[Mao11] Bo Mao. *Visualisation and generalisation of 3D City Models*. PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2011.

- [MF07] Liqiu Meng and Andrea Forberg. 3d building generalisation. *Generalization of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*, Elsevier, 2007.
- [MG14] Maxime Morel and Gilles Gesquière. Managing temporal change of cities with citygml. In *UDMV*, pages 37–42, 2014.
- [MHE+03] Morgan McGuire, John F Hughes, Kevin Egan, Mark J Kilgard, and Cass Everitt. Fast, practical and robust shadows. *Brown University Computer Science Tech Report CS-03-19*, November, 2003.
- [MHH03] Leena Matikainen, Juha Hyyppä, and Hannu Hyyppä. Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/W13):218–224, 2003.
- [Mic88] Joseph J Michalsky. The astronomical almanac’s algorithm for approximate solar position (1950–2050). *Solar energy*, 40(3):227–235, 1988.
- [MK08] Rodney H Matsuoka and Rachel Kaplan. People needs in the urban landscape: analysis of landscape and urban planning contributions. *Landscape and urban planning*, 84(1):7–19, 2008.
- [MKH07] Leena Matikainen, Harri Kaartinen, and Juha Hyyppä. Classification tree based building detection from laser scanner and aerial image data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 3):W52, 2007.
- [Mor13a] Peter James Morton. Virtual city models-a global perspective-short paper. In *CityGML in National Mapping Workshop*, 2013.
- [Mor13b] PJ Morton. A global perspective in the development and distribution of vcms. In *Proceedings of the Northumbria Research Conference, Newcastle, UK*, pages 15–16, 2013.
- [MR09] Eugenio Morello and Carlo Ratti. A digital image of the city: 3d isovists in lynch’s urban analysis. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36(5):837–853, 2009.

- [MS88] David R Musser and Alexander A Stepanov. Generic programming. In *International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation*, pages 13–25. Springer, 1988.
- [MTT+13] Jean-Christophe Michelin, Julien Tierny, Florence Tupin, Clément Mallet, and Nicolas Papanoditis. Quality evaluation of 3d city building models with automatic error diagnosis. In *ISPRS Conference on SSG*, 2013.
- [MWA+13] Przemyslaw Musialski, Peter Wonka, Daniel G Aliaga, Michael Wimmer, L v Gool, and Werner Purgathofer. A survey of urban reconstruction. In *Computer graphics forum*, volume 32, pages 146–177. Wiley Online Library, 2013.
- [NBB+15] Romain NOUVEL, Kai-Holger BRASSEL, Marcel BRUSE, Eric DUMINIL, Volker COORS, Ursula EICKER, and Darren ROBINSON. Simstadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for citygml city models. In *Proceedings of International Conference CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale*, number EPFL-CONF-213437, pages 889–894. LESO-PB, EPFL, 2015.
- [NDD14] Hoang Ha Nguyen, Brett Desbenoit, and Marc Daniel. Realistic road path reconstruction from gis data. In *Computer Graphics Forum*, volume 33, pages 259–268. Wiley Online Library, 2014.
- [NGZ+16] Pirouz Nourian, Romulo Gonçalves, Sisi Zlatanova, Ken Arroyo Ohoi, and Anh Vu Vo. Voxelization algorithms for geospatial applications: Computational methods for voxelating spatial datasets of 3d city models containing 3d surface, curve and point data models. *MethodsX*, 3:69 – 86, 2016.
- [NYI+10] Tomoki Nakaya, Keiji Yano, Yuzuru Isoda, Tatsunori Kawasumi, Yutaka Takase, Takashi Kirimura, Akihiro Tsukamoto, Ayako Matsumoto, Toshikazu Seto, and Takafusa Iizuka. Virtual kyoto project: Digital diorama of the past, present, and future of the historical city of kyoto. In *Culture and computing*, pages 173–187. Springer, 2010.
- [OGC16] OGC. OGC CityGML Quality Interoperability Experiment. Technical Report OGC 16-064, Open Geospatial Consortium, 2016.
- [OGW+13] Johannes Otepka, Sajid Ghuffar, Christoph Waldhauser, Ronald Hochreiter, and Norbert Pfeifer. Georeferenced point clouds: A survey of features

and point cloud management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(4):1038–1065, 2013.

[OK05] Brian Pilemann Olsen and Thomas Knudsen. Automated change detection for validation and update of geodata. 2005.

[Pau03] Mark Pauly. *Point primitives for interactive modeling and processing of 3D geometry*. PhD thesis, University of Kaiserslautern, 2003.

[PGG15] Clémentine Périnaud, Georges Gay, and Gilles Gesquière. Exploration of the changing structure of cities: Challenges for temporal city models. In *Digital Heritage, 2015*, volume 2, pages 73–76. IEEE, 2015.

[PKK+17] Petar Pejic, Sonja Krasic, Hristina Krstic, Magdalena Dragovic, and Yagz Akbiyik. 3d virtual modelling of existing objects by terrestrial photogrammetric methods-case study of barutana. *Tehnicki vjesnik*, 24(Supplement 1):233–239, 2017.

[PP11] Kuldeep Pareta and Upasana Pareta. Quantitative morphometric analysis of a watershed of yamuna basin, india using aster (dem) data and gis. *International journal of Geomatics and Geosciences*, 2(1):248, 2011.

[RAAC15] Ishat E Rabban, Kaysar Abdullah, Mohammed Eunos Ali, and Muhammad Aamir Cheema. Visibility color map for a fixed or moving target in spatial databases. In *International Symposium on Spatial and Temporal Databases*, pages 197–215. Springer, 2015.

[Ram14] Frederik Ramm. Openstreetmap data in layered gis format, 2014.

[RBDK09] Lutz Ross, Jannes Bolling, Jürgen Döllner, and Birgit Kleinschmit. Enhancing 3d city models with heterogeneous spatial information: Towards 3d land information systems. In *Advances in GIScience*, pages 113–133. Springer, 2009.

[RCB13] P Redweik, Cristina Catita, and Miguel Brito. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, 97:332–341, 2013.

[RG08] MZ Abd Rahman and B Gorte. *Individual tree detection based on densities of high points of high resolution airborne LiDAR*. University of Calgary, Canada, 2008.

[Rig65] L.A. Riggs. Visual acuity. *Vision and Visual Perception*, 1965.

- [Ros11] Daniele La Rosa. The observed landscape: map of visible landscape values in the province of enna (italy). *Journal of Maps*, 7(1):291–303, 2011.
- [Rot08] Franz Rottensteiner. Automated updating of building data bases from digital surface models and multi-spectral images: Potential and limitations. In *ISPRS Congress, Beijing, China*, volume 37, pages 265–270, 2008.
- [Rus10] Radu Bogdan Rusu. Semantic 3d object maps for everyday manipulation in human living environments. *KI-Künstliche Intelligenz*, 24(4):345–348, 2010.
- [SAD+12] Aneta Strzalka, Nazmul Alam, Eric Duminil, Volker Coors, and Ursula Eicker. Large scale integration of photovoltaics in cities. *Applied Energy*, 93:413–421, 2012.
- [SBAW13] Akira Sasagawa, Emmanuel Baltsavias, Sultan Kocaman Aksakal, and Jan Dirk Wegner. Investigation on automatic change detection using pixel-changes and dsm-changes with alos-prism triplet images. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 7:W2, 2013.
- [SC09] Claudia Schulte and Volker Coors. Development of a citygml ade for dynamic 3d flood information. *AGSE 2009*, page 10, 2009.
- [SFD09] Martin Stich, Heiko Friedrich, and Andreas Dietrich. Spatial splits in bounding volume hierarchies. In *Proceedings of the Conference on High Performance Graphics 2009*, pages 7–13. ACM, 2009.
- [SGM+13] Vanessa Sellin, Françoise Gourmelon, Sylvie Magnanon, Françoise Debaine, Laurence Hubert-Moy, Sébastien Rapinel, Antoine Janvre, Bernard Clément, Laurence David, Loc Delassus, et al. Cartographie des grands types de végétation par télédétection: étude de faisabilité (bretagne, basse-normandie et pays-de-la-loire). 2013.
- [SJF12] Wassim Suleiman, Thierry Joliveau, and Eric Favier. Une nouvelle méthode de calcul d’isovist en 2 et 3 dimensions. In *Actes de la Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale-SAGEO*, pages 366–386, 2012.
- [SJF13] Wassim Suleiman, Thierry Joliveau, and Eric Favier. A new algorithm for 3d isovists. In *Advances in Spatial Data Handling*, pages 157–173. Springer, 2013.

- [SK07] Alexandra Stadler and Thomas H Kolbe. Spatio-semantic coherence in the integration of 3d city models. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Quality, Enschede, 2007*.
- [SLNZ09] Arne Schilling, Sandra Lanig, Pascal Neis, and Alexander Zipf. Integrating terrain surface and street network for 3d routing. In *3D Geo-Information Sciences*, pages 109–126. Springer, 2009.
- [ŠMO16] Radan Šuba, Martijn Meijers, and Peter van Oosterom. Continuous road network generalization throughout all scales. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(8):145, 2016.
- [SS13] Shaohui Sun and Carl Salvaggio. Aerial 3d building detection and modeling from airborne lidar point clouds. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3):1440–1449, 2013.
- [SSN09] Ashutosh Saxena, Min Sun, and Andrew Y Ng. Make3d: Learning 3d scene structure from a single still image. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 31(5):824–840, 2009.
- [SSS06] Noah Snavely, Steven M Seitz, and Richard Szeliski. Photo tourism: exploring photo collections in 3d. In *ACM transactions on graphics (TOG)*, volume 25, pages 835–846. ACM, 2006.
- [SSS08] Noah Snavely, Steven M Seitz, and Richard Szeliski. Modeling the world from internet photo collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2):189–210, 2008.
- [STH80] Chester C Slama, Charles Theurer, and Soren W Henriksen. *Manual of photogrammetry*. American Society of photogrammetry, 1980.
- [TBP13] Aparna Taneja, Luca Ballan, and Marc Pollefeys. City-scale change detection in cadastral 3d models using images. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 113–120, 2013.
- [TKLG+07] Fayez Tarsha-Kurdi, Tania Landes, Pierre Grussenmeyer, et al. Hough-transform and extended ransac algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from lidar data. In *Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning*, volume 36, pages 407–412, 2007.

- [TO02] Greg Turk and James F O'brien. Modelling with implicit surfaces that interpolate. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(4):855–873, 2002.
- [TV04] Johan WH Tangelder and Remco C Veltkamp. A survey of content based 3d shape retrieval methods. In *Shape Modeling Applications, 2004. Proceedings*, pages 145–156. IEEE, 2004.
- [TWC08] Martin Tomko, Stephan Winter, and Christophe Claramunt. Experiential hierarchies of streets. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(1):41–52, 2008.
- [VAW+10] Carlos A Vanegas, Daniel G Aliaga, Peter Wonka, Pascal Müller, Paul Waddell, and Benjamin Watson. Modelling the appearance and behaviour of urban spaces. In *Computer Graphics Forum*, volume 29, pages 25–42. Wiley Online Library, 2010.
- [VLA15] Yannick Verdie, Florent Lafarge, and Pierre Alliez. Lod generation for urban scenes. Technical report, Association for Computing Machinery, 2015.
- [VPDB09] Bruno Vallet, Marc Pierrot-Deseilligny, and Didier Boldo. Building footprint database improvement for 3d reconstruction: a direction aware split and merge approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(Part 3):W4, 2009.
- [VPDBB11] Bruno Vallet, Marc Pierrot-Deseilligny, Didier Boldo, and Mathieu Brédif. Building footprint database improvement for 3d reconstruction: A split and merge approach and its evaluation. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 66(5):732–742, 2011.
- [Wal07] Ingo Wald. On fast construction of sah-based bounding volume hierarchies. In *Interactive Ray Tracing, 2007. RT'07. IEEE Symposium on*, pages 33–40. IEEE, 2007.
- [WD00] Paul R Wolf and Bon A Dewitt. *Elements of photogrammetry: with applications in GIS*, volume 3. McGraw-Hill New York, 2000.
- [Wei11] Gerd Weitkamp. Mapping landscape openness with isovists. *Research in Urbanism Series*, 2(1):205–223, 2011.
- [WH94] Nigel P Weatherill and Oubay Hassan. Efficient three-dimensional delaunay triangulation with automatic point creation and imposed boundary

constraints. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(12):2005–2039, 1994.

[WJ87] ID Watson and GT Johnson. Graphical estimation of sky view-factors in urban environments. *Journal of Climatology*, 7(2):193–197, 1987.

[WMV+08] Benjamin Watson, Pascal Müller, Oleg Veryovka, Andy Fuller, Peter Wonka, and Chris Sexton. Procedural urban modeling in practice. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28(3), 2008.

[WNMW15] Manfred Wieland, Alexandru Nichersu, Syed Monjur Murshed, and Jochen Wendel. Computing solar radiation on citygml building data. In *18th AGILE International conference on Geographic Information Science*, 2015.

[WNW12] Andrew Wallace, Caroline Nichol, and Iain Woodhouse. Recovery of forest canopy parameters by inversion of multispectral lidar data. *Remote Sensing*, 4(2):509–531, 2012.

[WT97] Brian A Wandell and Stephen James Thomas. Foundations of vision. *Psychocritiques*, 42(7):649, 1997.

[YHNF03] Suya You, Jinhui Hu, Ulrich Neumann, and Pamela Fox. Urban site modeling from lidar. *Computational Science and Its Applications-ICCSA 2003*, pages 987–987, 2003.

[YNG14] Nurulhuda Abdul Hamid Yusoff, Anuar Mohd Noor, and Rosmadi Ghazali. City skyline conservation: sustaining the premier image of kuala lumpur. *Procedia Environmental Sciences*, 20:583–592, 2014.

[YNI07] Keiji Yano, Tomoki Nakaya, and Yuzuru Isoda. Virtual kyoto: exploring the past, present and future of kyoto. *Nakanishiya, Kyoto*, 2007.

[YNI+08] Keiji Yano, Tomoki Nakaya, Yuzuru Isoda, Yutaka Takase, Tatsunori Kawasumi, Keigo Matsuoka, Toshikazu Seto, Dai Kawahara, Akihiro Tsukamoto, Manabu Inoue, et al. Virtual kyoto: 4dgis comprising spatial and temporal dimensions. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 117(2):464–478, 2008.

[YPL07] Perry Pei-Ju Yang, Simon Yunuar Putra, and Wenjing Li. Viewsphere: a gis-based 3d visibility analysis for urban design evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(6):971–992, 2007.

- [ZCP12] Alaitz Zabala, Cristina Cea, and Xavier Pons. Segmentation and thematic classification of color orthophotos over non-compressed and jpeg 2000 compressed images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 15:92–104, 2012.
- [ZH14] Lingli Zhu and Juha Hyypä. Fully-automated power line extraction from airborne laser scanning point clouds in forest areas. *Remote Sensing*, 6(11):11267–11282, 2014.
- [Zha10] Peisheng Zhao. *Geospatial Web Services: Advances in Information Interoperability: Advances in Information Interoperability*. IGI Global, 2010.
- [ZN08] Qian-Yi Zhou and Ulrich Neumann. Fast and extensible building modeling from airborne lidar data. In *Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems*, page 7. ACM, 2008.

Liste des publications

Pedrinis F., Morel M., and Gesquière G. (2015). "Change Detection of cities". 3D Geoinformation Science - Lecture Notes in Geoinformation and Cartography 2015, 123-139. doi: 10.1007/978-3-319-12181-9_8.

Gaillard J., Vienne A., Baume R., **Pedrinis F.**, Peytavie A., Gesquière G. (2015). "Urban Data Visualisation in a web browser". Proceedings of the Twentieth International ACM Conference on 3D Web Technologies, 2015.

Jacquiod, F., **Pedrinis, F.**, Edert, J., & Gesquière, G. (2016). "Automated Production of Interactive 3D Temporal Geovisualizations so as to Enhance Flood Risk Awareness". In UDMV 2016.

Pedrinis, F., & Gesquière, G. (2017). "Reconstructing 3D Building Models with the 2D Cadastre for Semantic Enhancement". In Advances in 3D Geoinformation (pp. 119-135). Springer International Publishing.

Jaillet V., **Pedrinis F.**, Servigne S., Gesquière G. (2017). "A generic approach for sunlight and shadow impact computation on large city models". In World Society for Computer Graphics (WSCG) 2017.