

# État de l'art : Reconstruction de modèle 3D à partir d'OpenStreetMap

## Table des matières

I/ Introduction.....	2
II/ Méthodes de reconstruction de modèle 3D.....	4
1/ Méthodes connaissant la hauteur des bâtiments.....	4
a) Cas de LoD0.....	4
b) Cas de LoD1.....	6
c) Cas de LoD2.....	8
d) Cas de LoD3 ou LoD2+.....	9
e) Cas de LoD4.....	12
2/ Méthodes ne connaissant pas la hauteur des bâtiments.....	15
a) A partir de données cadastres.....	15
b) A partir de données géométriques.....	18
c) A partir de données démographiques et socio-économiques.....	19
d) A partir de photographies.....	23
III/ Conclusion.....	23
IV/ Références.....	24

# I/ Introduction

Un modèle 3D urbain reconstruit à partir de données OSM (« OpenStreetMap », qui permet de stocker des données géographiques) est un outil très utile pour les autorités des villes afin de permettre la planification de projets de travaux urbains. Il est également bien plus facile à utiliser et interactif que les cartes digitales comme OSM ainsi que les simples cartes dessinées à la main. D'ailleurs, un stockage sous forme numérique de données géographiques permet d'éviter d'éventuels dégâts pouvant nuire à l'intégrité et la validité de ces données : d'où la nécessité d'utiliser les cartes digitales comme OSM plutôt que les cartes dessinées à la main dans le cadre de notre projet de reconstruction d'un modèle 3D urbain, afin de s'assurer d'accéder à des sources de données fiables. Il existe différents formats numériques pour représenter un modèle 3D urbain, citons : Collada, KML (« Keyhole Markup Language »), ainsi que CityGML (« City Geography Markup Language »), qui sont toutes des extensions du langage XML. Ici, nous allons nous concentrer sur CityGML qui a l'avantage de combiner des données sémantiques ou topologiques aux objets géographiques 3D dans un modèle 3D urbain : ce qui fait de CityGML le format le plus utilisé actuellement.

Commençons donc par définir CityGML : c'est un modèle de données public et standardisé ainsi qu'un format d'échange qui permet de stocker numériquement des modèles 3D de villes. Posons-nous maintenant une question importante : quelles sont les principales caractéristiques d'un tel modèle 3D en format CityGML ?

Nous savons déjà qu'il contient un ensemble d'objets géographiques 3D placés sur un terrain donné dans un environnement urbain. L'ensemble de ces objets définit le domaine applicatif d'un modèle CityGML, et chacun d'entre eux peut être modélisé grâce aux fonctionnalités fournies par le format GML (« Geography Markup Language ») : ces fonctionnalités concernent notamment la géométrie des objets ainsi que leurs caractéristiques et leur topologie, des éléments graphiques dynamiques, des styles de présentation, ou encore le système de coordonnées de référence...

Chaque objet géographique dans un modèle CityGML est représenté sur OSM par un certain ensemble de vecteurs 2D. L'ensemble des données vectorielles 2D sur OSM forment en fait un énorme graphe non connexe et non orienté composé de « nœuds » et de « chemins ». Les « nœuds » représentent les bâtiments et les « chemins » les rues ou routes connectant plusieurs bâtiments entre eux. Ainsi, un groupe de nœuds connectés entre eux par un chemin forment une composante connexe dans le graphe. De plus, chaque nœud ou chemin est représenté sur OSM par un ensemble de vecteurs 2D formant des polygones fermés de toutes taille : chaque polygone décrit donc une « relation » entre plusieurs vecteurs 2D, exprimée sous forme d'entité OSM. Chaque entité OSM peut également être annotée d'informations sémantiques telles que la hauteur d'un bâtiment, qui doit alors être représentée sous la forme d'une paire « clé-valeur » dans une zone textuelle dédiée. Enfin, il est important de définir le niveau de détail de notre modèle 3D : les bâtiments seront-ils seulement représentés de l'extérieur, ou bien leur intérieur pourra-t-il également être visualisé ? Aussi, quel sera le niveau de détail de leur architecture ?

Pour répondre à cette question, CityGML définit 5 niveaux de détail standards (abrégés « LoDs ») :

- LoD0 : le niveau de détail le plus faible, caractérisé par un simple modèle digital de terrain (DTM) en 2.5D sans les bâtiments.
- LoD1 : les bâtiments y sont représentés par des modèles en bloc, extraits à partir de leur marque sur OSM.
- LoD2 : on ajoute à LoD1 les modèles de toit et autres éléments d'architecture en plus.
- LoD3 : on ajoute à LoD2 les modèles de façade de bâtiment en plus, ce qui donne une architecture beaucoup plus détaillée des bâtiments.
- LoD4 : le niveau de détail le plus élevé, on ajoute à LoD3 les modèles des intérieurs des bâtiments en plus.

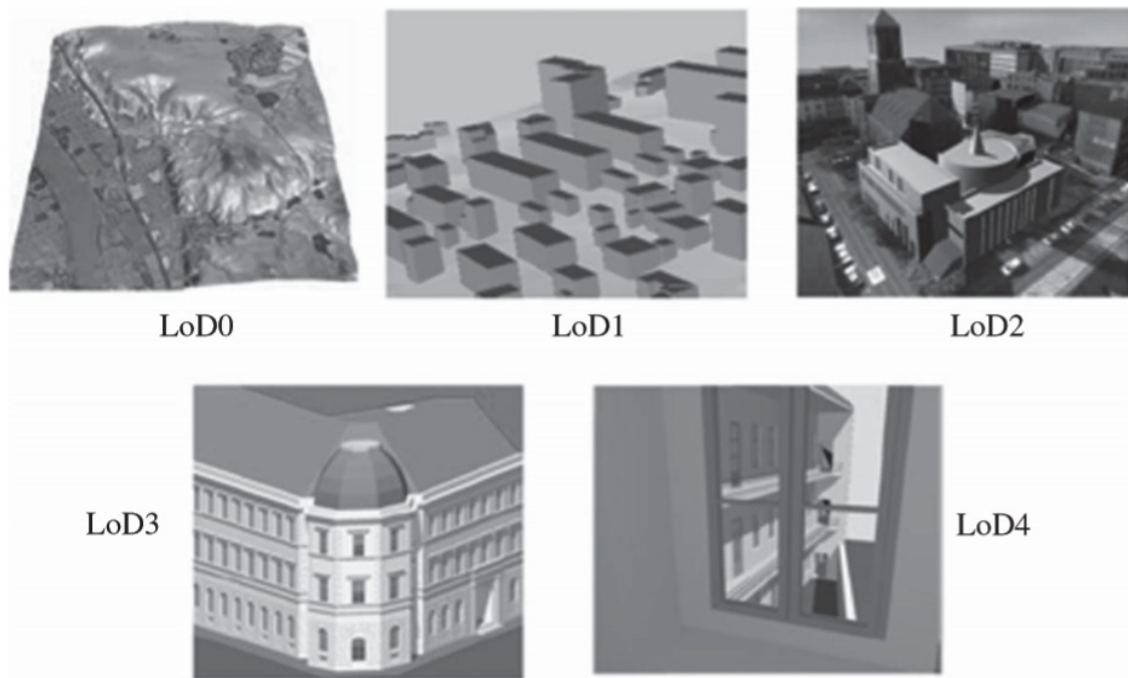


Fig. 1 : les 5 différents niveaux de détail dans CityGML (Gröger et Al. 2008)  
(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2012.721552>)

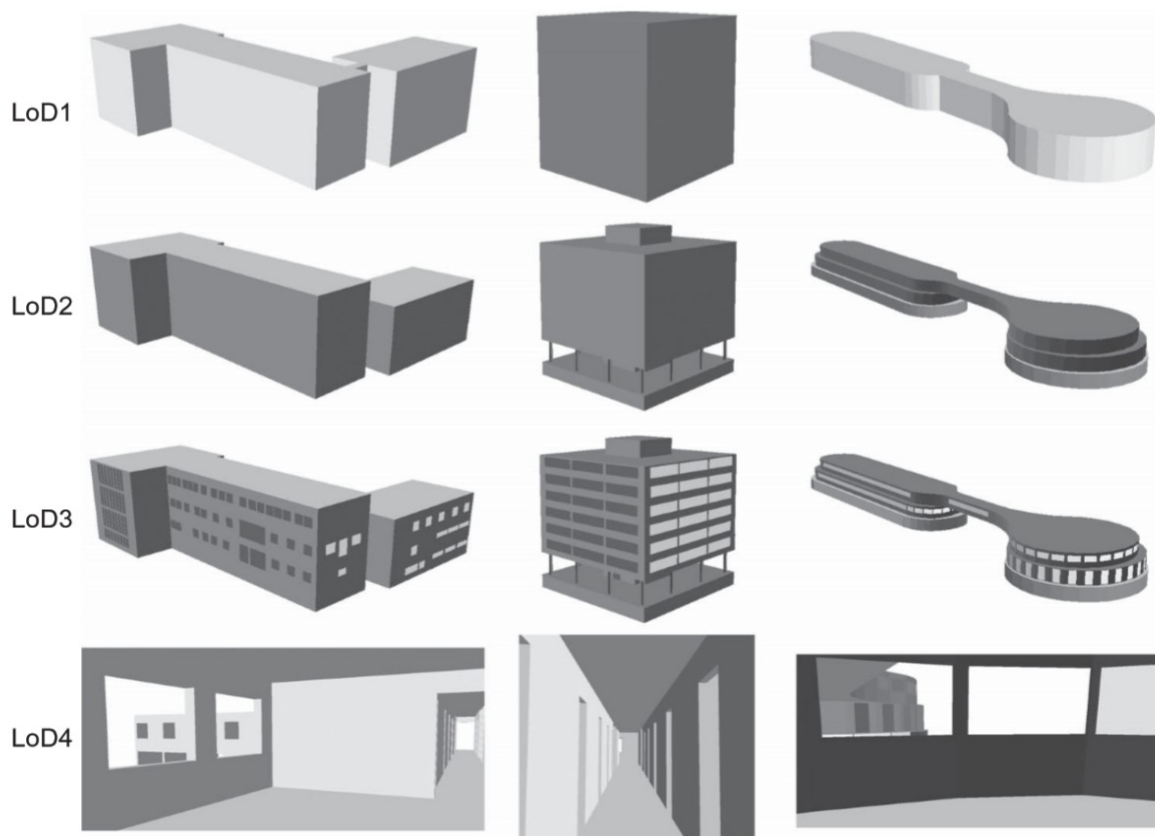


Fig. 2 : 4 exemples de modèles 3D de bâtiments dans CityGML, reconstruits depuis OSM pour chaque niveau de détail de LoD1 à LoD4  
(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2012.721552>)

Par la suite, on présentera les principales méthodes de reconstruction d'un modèle 3D CityGML à partir d'OSM : d'une part celles dont la hauteur des bâtiments reconstruits est connue, et d'autre part celles dont la hauteur des bâtiments reconstruits est inconnue. Nous insistons sur le fait que la hauteur des bâtiments est une information cruciale qui ne peut pas être négligée dans la reconstruction car elle constitue la dimension verticale (l'axe des ordonnées « y ») de notre modèle 3D.

Dans la première partie sur les méthodes connaissant la hauteur des bâtiments, nous présenterons les algorithmes de reconstruction utilisés pour chaque niveau de détail de LoD0 à LoD4.

Dans la seconde partie sur les méthodes ne connaissant pas la hauteur des bâtiments, nous présenterons les différentes métriques de calcul approximatif de la hauteur : celles utilisant les données cadastres (relatives aux différentes caractéristiques d'un bâtiment), démographiques, et géométriques des bâtiments notamment. Ces métriques de calcul supposent d'ailleurs que la hauteur d'une partie des bâtiments est déjà connue.

Enfin, nous citerons l'emploi de photographies pour permettre une reconstruction des bâtiments sans utiliser l'information sur leur hauteur.

## II/ Méthodes de reconstruction de modèle 3D

### 1/ Méthodes connaissant la hauteur des bâtiments

Dans les algorithmes de reconstruction que nous allons présenter ci-dessous pour chaque niveau de détail (de LoD1 à LoD4), on suppose que l'on connaît déjà d'avance la hauteur des bâtiments. Cette information sur la hauteur doit donc pouvoir être extraite depuis la fiche indicative associée à chaque bâtiment dans OSM, ou alors être entrée par l'utilisateur lui-même (dans ce cas, on perd alors en automatisation). Cette fiche indicative (qui n'est qu'une simple zone textuelle sur OSM) peut souvent contenir des informations sémantiques sur les données 3D d'un bâtiment donné telles que la hauteur, le nombre d'étages, le type d'usage, etc... qui sont alors cruciales pour la reconstruction dans notre modèle urbain. Dans l'entité OSM associée, des variables avec leur valeur permettent d'accéder à ces informations sémantiques.

Avant de commencer à modéliser des bâtiments, il faut d'abord générer le terrain sur lequel nous allons construire notre modèle : le modèle LoD0 est spécialement prévu à cet effet. Nous allons donc tout d'abord présenter son algorithme de reconstruction :

#### a) Cas de LoD0

Pour générer un modèle digital de terrain (DTM) ou modèle LoD0, on commence d'abord à générer un réseau triangulaire irrégulier (TIN) à partir d'un ensemble non connecté de points d'élévation en utilisant l'algorithme de triangulation de Delaunay. Un TIN correspond à la représentation d'une surface continue composée entièrement de faces triangulaires (qui ne s'entrecroisent pas), dont chaque sommet est ici annoté de l'information sur l'altitude du point d'élévation associé.

Or, il faut pouvoir recueillir cet ensemble de points d'élévation à partir d'une base de données spécifique (qui devrait être fournie par l'utilisateur lui-même pour éviter un surplus de données dans notre modèle) représentant numériquement le relief d'une surface terrestre, appelée modèle digital d'élévation (DEM). Pour ce faire, plusieurs techniques sont possibles :

- L'utilisation des lignes de contours sur les cartes topographiques : à chaque ligne de contour est annotée l'information sur l'altitude des points d'élévation environnants. Le problème est

que ces lignes de contours ainsi que l'information sur leur altitude sont absentes d'OSM. On pourrait cependant télécharger des cartes topographiques de différents terrains en ligne puis les importer dans notre modèle.

- L'utilisation d'images satellite ou aériennes : on fait alors le lien entre les points d'élévation et les pixels de l'image pour calculer l'altitude de ces points.
- L'utilisation de données aériennes « Lidar » (télédétection par laser) : les informations sur les altitudes peuvent alors directement être extraites de ces données en ligne puis importées dans notre modèle.
- L'utilisation de données provenant de « Google Earth » : l'altitude de tout point sur Terre est présente sur « Google Earth »... or, il paraît compliqué d'automatiser des requêtes depuis OSM en direction de « Google Earth » afin de recueillir des informations sur l'altitude.

Après avoir généré le TIN, il faut ensuite générer les textures de chacune des faces triangulaires en se basant sur des photographies satellites ou aériennes par exemple. Cependant, il serait préférable d'utiliser des textures prédéfinies de différents types de terrains pour nous simplifier la tâche.

Une fois les textures de toutes les faces générées, on a maintenant réussi à obtenir la base de notre modèle LoD0 (DTM) sur lequel on peut commencer à modéliser des bâtiments à partir d'OSM : c'est l'étape de la génération de modèle LoD1.

Référence : [Zlatanova&al. 2013]

Source : <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-2-W2/19/2013/isprsarchives-XL-2-W2-19-2013.pdf>

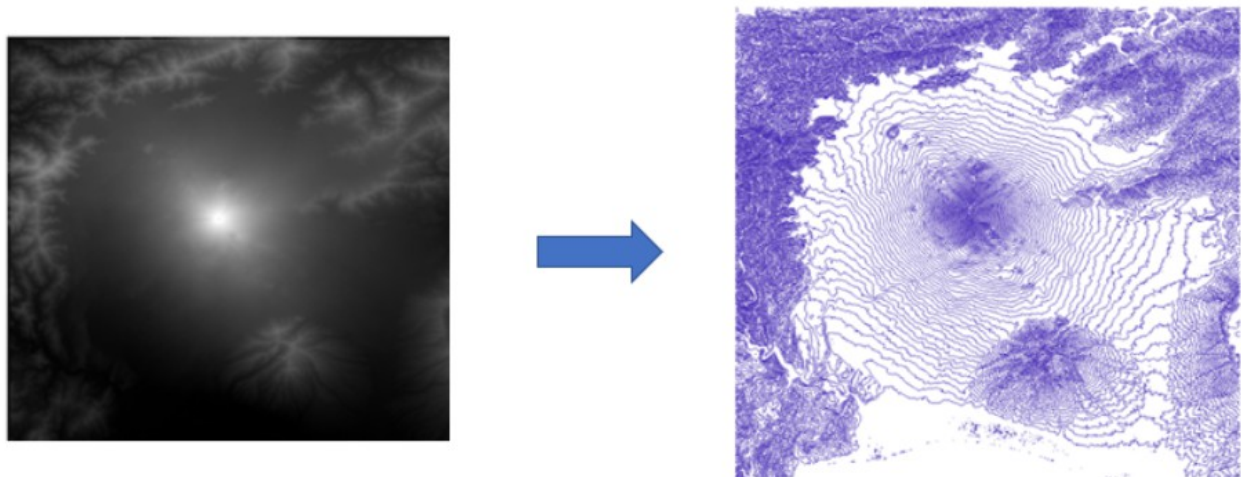


Fig. 3 : Un DEM à gauche converti en lignes de contours à droite  
(source : <https://medium.com/omdena/how-to-build-an-elevation-map-for-forest-cover-79953350c7d6> )

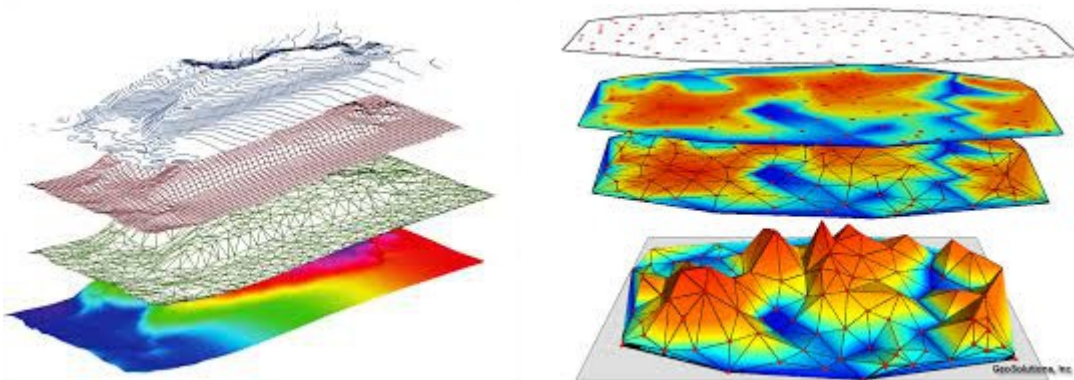




Fig. 4 : Illustration de 4 étapes de génération d'un DTM à gauche puis à droite respectivement.

A gauche, on utilise l'algorithme général :

- à partir d'un DEM, on génère des lignes de contours en 3D
- On calcule un ensemble de points d'élévation à partir de ces lignes de contours
- Ensuite, on génère un TIN en 3D toujours à partir des points d'élévation en utilisant l'algorithme de triangulation de Delaunay
- Enfin, on génère les textures de chacune des faces triangulaires de ce TIN

A droite, on utilise une variante :

- à partir d'un DEM, on génère un ensemble non connecté de points d'élévation en 2D
- On génère ensuite directement les textures de l'ensemble
- Ensuite, on génère un TIN en 2D toujours à partir des points d'élévation en utilisant l'algorithme de triangulation de Delaunay
- Enfin, on convertit ce TIN en 3D en utilisant l'information sur les altitudes des points d'élévation

(sources : <https://medium.com/omdena/how-to-build-an-elevation-map-for-forest-cover-79953350c7d6> ; <http://miningology.blogspot.com/2015/07/triangulated-irregular-network-tin.html> )

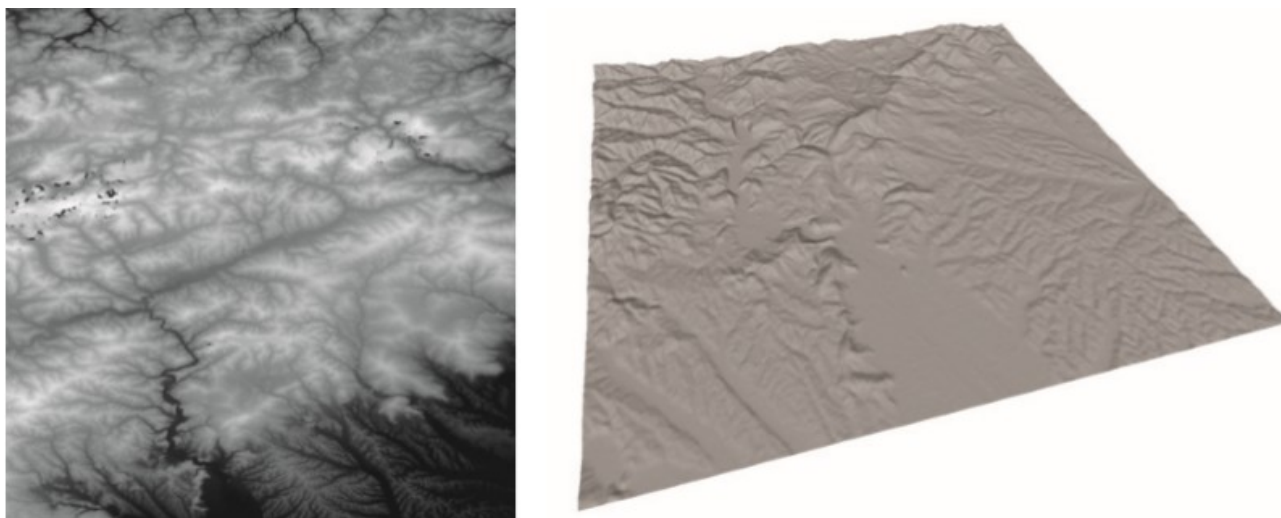


Fig. 5 : A gauche, un DEM et à droite, le DTM qui y est associé (source: [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Institute/ICG/Images/team\\_fraundorfer/personal\\_page\\_s/markus\\_rumpler/citymodeling\\_cvww2012.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/ICG/Images/team_fraundorfer/personal_page_s/markus_rumpler/citymodeling_cvww2012.pdf))

## b) Cas de LoD1

Pour générer un modèle LoD1 à partir d'OSM, il faudrait extraire les empreintes au sol des bâtiments dans la zone d'intérêt : pour ce faire, on pourrait identifier tous les polygones fermés d'une certaine couleur de fond (souvent grise) dans la zone d'intérêt sur OSM puis en extraire les vecteurs 2D qui les composent. On doit donc identifier les entités OSM qui correspondent à des « noeuds » dans le graphe des données vectorielles 2D.

On peut ensuite calculer la taille d'un bâtiment (en terme de largeur et longueur) dans la zone suivant une échelle choisie dans notre modèle 3D urbain, en respectant les proportions imposées par les dimensions vectorielles de l'empreinte au sol extraite. Grâce à l'information sur la hauteur extraite depuis la fiche indicative (qui contient toutes les informations sémantiques) associée au bâtiment dans OSM ou alors celle entrée par l'utilisateur, on peut ainsi reconstruire le modèle 3D du bâtiment avec les bonnes dimensions dans notre modèle urbain.

Après avoir reconstruit les modèles 3D de chaque bâtiment, on doit les superposer à la bonne position ainsi qu'à la bonne hauteur au DTM du modèle LoD0 généré précédemment. Pour trouver la bonne position, on peut utiliser les coordonnées géographiques (latitude et longitude) des entités OSM associées aux bâtiments. Pour trouver la bonne hauteur, il suffit de choisir des points du DTM qui permettent de voir les contours des bâtiments dans notre modèle urbain du mieux possible.

Référence : [Martel&al. 2019]

Source : [https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/102489/1/VISAPP\\_2019\\_CamRe.pdf](https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/102489/1/VISAPP_2019_CamRe.pdf)

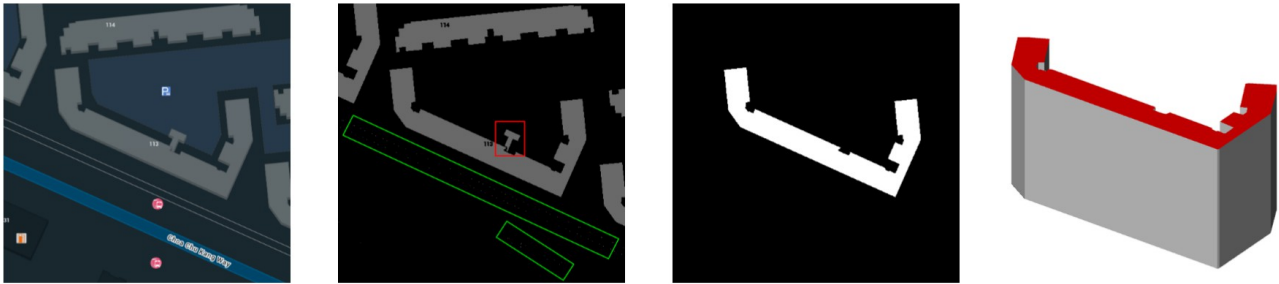


Fig. 6 : Les 4 étapes pour la reconstruction du modèle 3D d'un bâtiment à partir de sa marque. De gauche à droite :

- On trouve la zone contenant le bâtiment d'intérêt sur OSM à partir de ses coordonnées géographiques.
- Si visuellement parlant, on remarque la présence de discontinuités sur les contours du bâtiment sur OSM, on les ignore en ne considérant que les vecteurs 2D qui composent l'entité OSM associée.
- On extrait l'empreinte au sol du bâtiment à partir de l'analyse des vecteurs 2D qui composent l'entité OSM associée.
- On calcule la taille du bâtiment (en longueur et largeur) dans notre modèle urbain à partir de l'échelle choisie et des dimensions vectorielles de l'empreinte au sol extraite, puis on reconstruit son modèle 3D à partir de l'information sur sa hauteur (connue d'avance).

(source : [https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/102489/1/VISAPP\\_2019\\_CamRe.pdf](https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/102489/1/VISAPP_2019_CamRe.pdf))

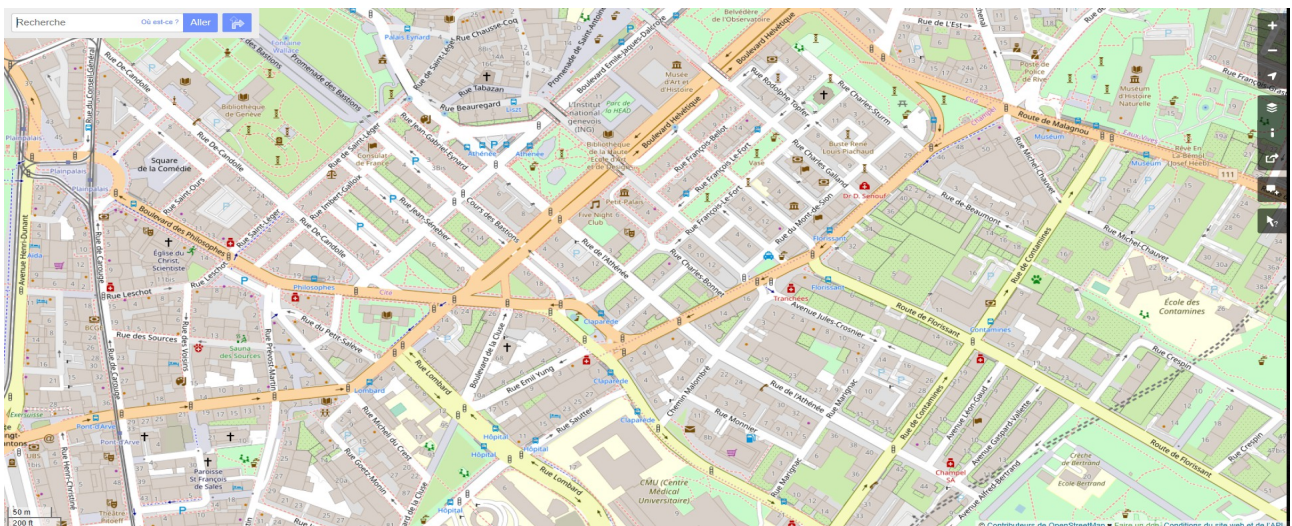


Fig. 7 : Obtention d'une image d'une zone urbaine Genevoise à partir d'OSM

(source : <https://www.openstreetmap.org/#map=17/46.19683/6.15117>)

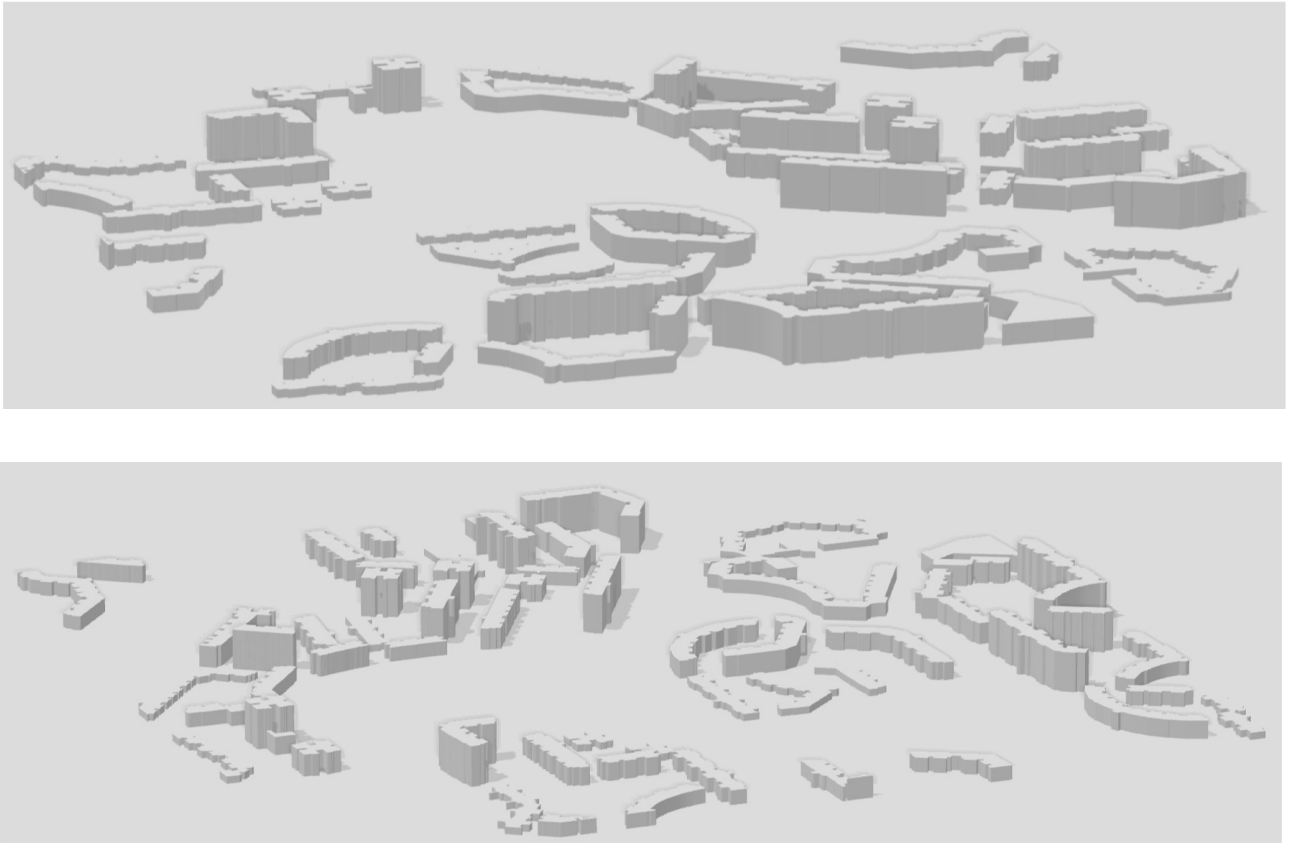


Fig. 8 : 2 vues différentes en 3D d'un même modèle LoD1 de bâtiments  
(source : [https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/102489/1/VISAPP\\_2019\\_CamRe.pdf](https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/102489/1/VISAPP_2019_CamRe.pdf))

### c) Cas de LoD2

Pour générer un modèle LoD2 à partir d'un modèle LoD1 déjà existant, il faudrait disposer de photographies de la façade extérieure de chaque bâtiment dans la zone d'intérêt pour déjà avoir une idée de leur architecture : en effet, les données OSM ne suffisent pas ici. L'utilisateur pourra ensuite entrer les informations nécessaires à la modélisation des éléments d'architecture de chaque bâtiment (la méthode de génération du modèle 3D des bâtiments devient alors semi-automatique). Pour ce faire, l'utilisateur doit fournir le style d'architecture, l'orientation, la taille, la couleur, etc... c'est à dire l'ensemble des caractéristiques de chaque élément d'architecture, correspondant à un objet *BuildingPart* dans le modèle CityGML. Ces éléments d'architecture concernent notamment : le toit, les cheminées, balcons, escaliers extérieurs, etc... par souci de simplicité, on ne représente souvent que le toit dans la plupart des modèles LoD2.

Dans le cas de LoD2, on ne considère pas la structure des étages (d'un point de vue extérieur ou intérieur) présents dans un bâtiment, à l'inverse de LoD3 et LoD4. Par ailleurs, on ne représente souvent pas les ouvertures telles que les portes et fenêtres, alors qu'elle sont systématiquement représentées dans le cas de LoD3 ou LoD4.

Référence : [Rumpler&al. 2012]

Source : [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Institute/ICG/Images/team\\_fraundorfer/personal\\_pages/markus\\_rumpler/citymodeling\\_cvww2012.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/ICG/Images/team_fraundorfer/personal_pages/markus_rumpler/citymodeling_cvww2012.pdf)



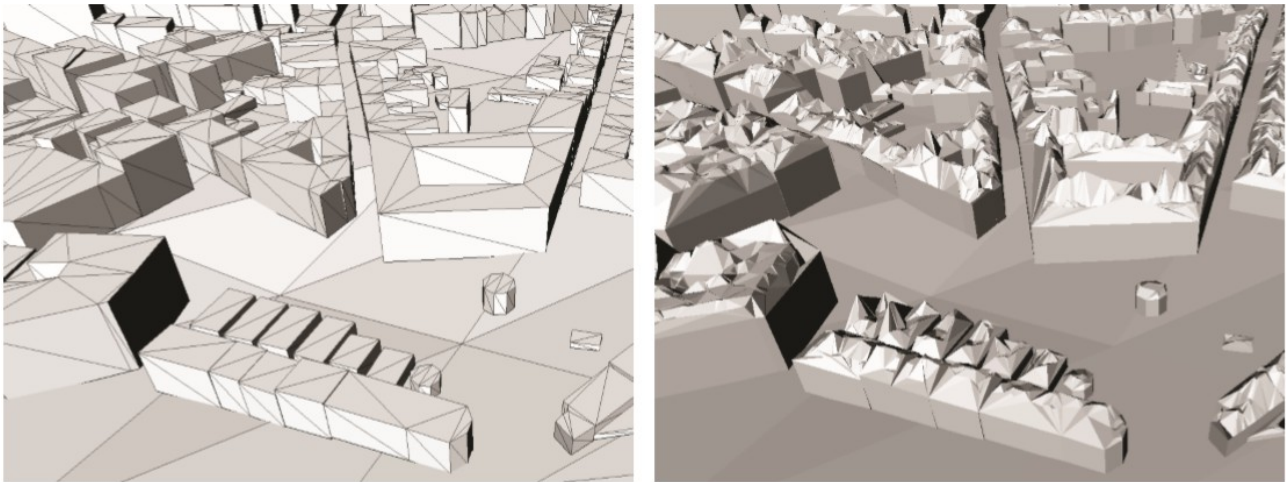


Fig. 9 : Comparaison d'un modèle LoD1 (à gauche) et LoD2 (à droite) de bâtiments ; on remarque que la géométrie des toits a été ajoutée au sommet de chaque bâtiment.

(source : [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Institute/ICG/Images/team\\_fraundorfer/personal\\_pages/markus\\_rumpler/citymodeling\\_cvww2012.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/ICG/Images/team_fraundorfer/personal_pages/markus_rumpler/citymodeling_cvww2012.pdf))

#### d) Cas de LoD3 ou LoD2+

Pour générer un modèle LoD3 à partir d'un modèle LoD2 déjà existant, il faudrait avoir accès à des données provenant « d'IndoorOSM » (Götz & Zipf, 2011) : ceci correspond à une extension d'OSM qui contient des informations sur la structure de l'intérieur des bâtiments à chaque étage, c'est à dire un ensemble de noeuds, relations et paires « clé-valeur ». Par exemple, une ouverture est représentée sur « IndoorOSM » par un nœud se trouvant au milieu et à hauteur du sol, auquel on a associé une certaine valeur à la largeur et hauteur (voir figure 11). Malheureusement, les données présentes sur « IndoorOSM » ne sont pas exhaustives, donc on ne peut pas modéliser n'importe quelle zone urbaine en LoD3 ou LoD4 de façon automatique. De plus, ces données doivent respecter un certain nombre de contraintes pour permettre une reconstruction de l'intérieur des bâtiments sans erreur.

Cependant, des photographies de la façade extérieure de chaque bâtiment peut aider l'utilisateur à entrer les informations nécessaires à la modélisation des bâtiments en LoD3 : si on dispose déjà de ces photographies dans un modèle LoD2, il suffit alors de les reprendre, mais en considérant cette fois-ci la présence d'ouvertures (portes et fenêtres) notamment.

La principale différence avec un modèle LoD2 est que la façade des bâtiments est modélisée avec plus de détails dans le cas de LoD3 (voir figure 12), car les étages des bâtiments sont ici pris en compte : en effet, l'architecture du bâtiment est cette fois-ci modélisée d'étage en étage, et non en une seule fois d'un point de vue extérieur. Par exemple, l'aire de surface du sol et du plafond ainsi que le nombre d'ouvertures (fenêtres et portes) peut changer d'étage en étage, ce qui donne une architecture différente suivant l'étage observé de l'extérieur.

Afin de générer le modèle 3D d'un bâtiment en LoD3 à partir « d'IndoorOSM », il faudrait identifier la géométrie des contours extérieurs de chacun de ses étages dans leur ordre d'apparition logique (en partant de l'étage le plus bas jusqu'à l'étage le plus haut). L'information sur le nombre d'étages d'un bâtiment est d'ailleurs souvent présente sur OSM. La géométrie des ouvertures telles que les fenêtres et portes doit également pouvoir être identifiée à chaque étage.

Références : [Goetz 2012] [Boeters&al. 2015] [Zipf&Fan 2016]

Sources : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2012.721552>

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2015.1072201>

Sur le schéma ci-dessous, on a présenté le processus détaillé de génération du modèle 3D d'un bâtiment en LoD3 à partir « d'IndoorOSM » étape par étape :

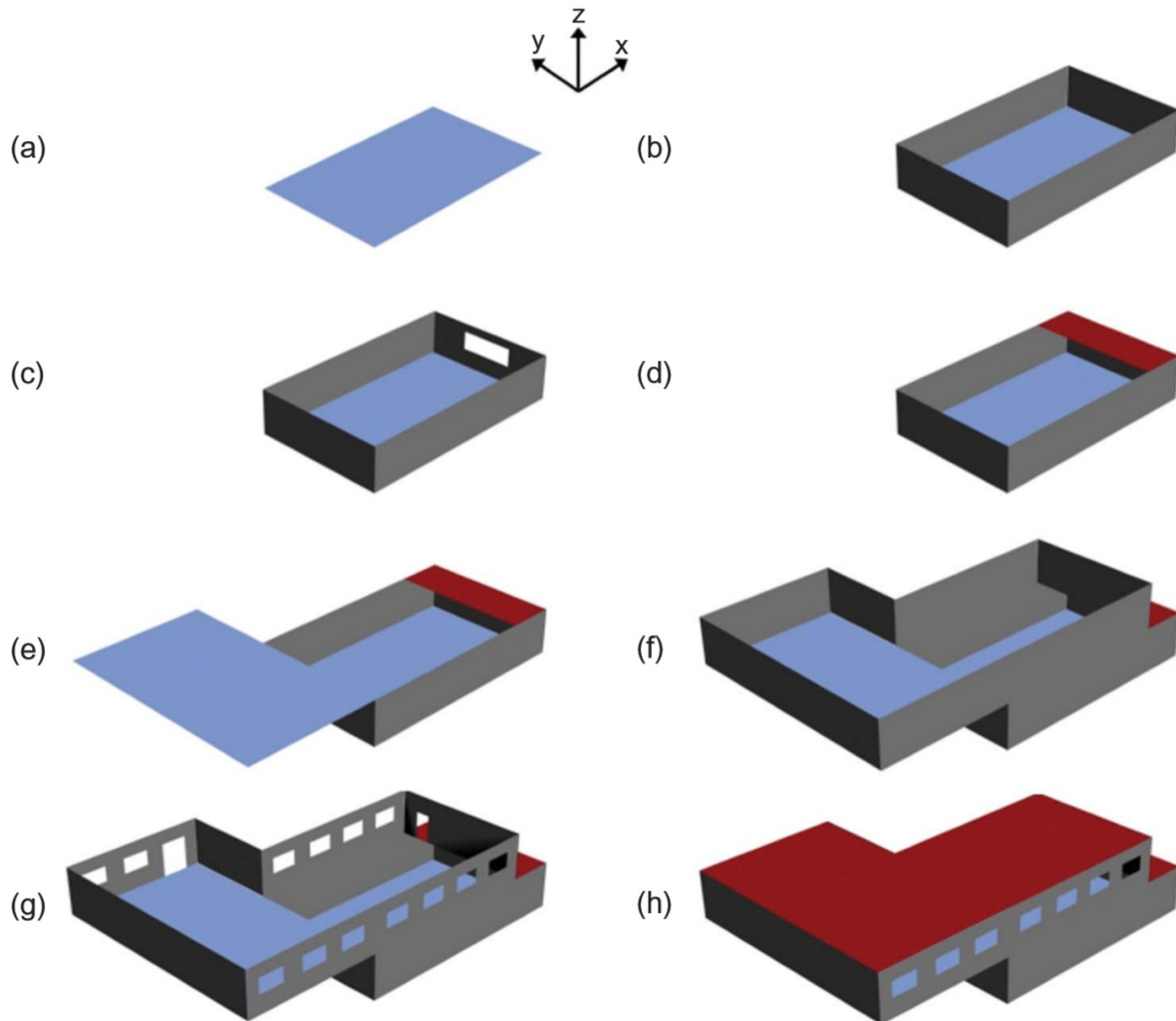


Fig. 10 : Les 8 étapes de génération du modèle 3D d'un bâtiment à 2 étages en LoD3 à partir « d'IndoorOSM » (les mots en italique correspondent aux objets du modèle CityGML présenté en figure suivante associés aux éléments des bâtiments) :

- a) Calcul de la surface du sol (*GroundSurface*) à l'étage le plus bas du bâtiment.
- b)/f) Génération des murs extérieurs (*WallSurface*) à la bonne hauteur sur chaque côté du bâtiment à l'étage courant.
- c)/g) Ajout de l'ensemble des ouvertures (*Opening*) présentes à l'étage courant et pour chacune d'entre elles, association d'un objet *InteriorRing* à l'objet *WallSurface* correspondant.
- d)/h) S'il existe un étage supérieur, calcul de la surface du toit (*RoofSurface*) en soustrayant la surface du sol à l'étage courant par la surface vide à l'étage supérieur se trouvant seulement entre les murs extérieurs de l'étage courant ; puis on continue en e). Sinon, la surface du toit est égale à celle du sol à l'étage courant et on a terminé.
- e) Calcul de la surface du sol (*GroundSurface*) à l'étage supérieur en soustrayant sa surface totale par la surface du sol à l'étage courant se trouvant seulement entre les murs extérieurs de l'étage supérieur (ou la surface vide à l'étage supérieur). Ensuite, on retourne en f) où l'étage supérieur devient l'étage courant.

(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2012.721552>)

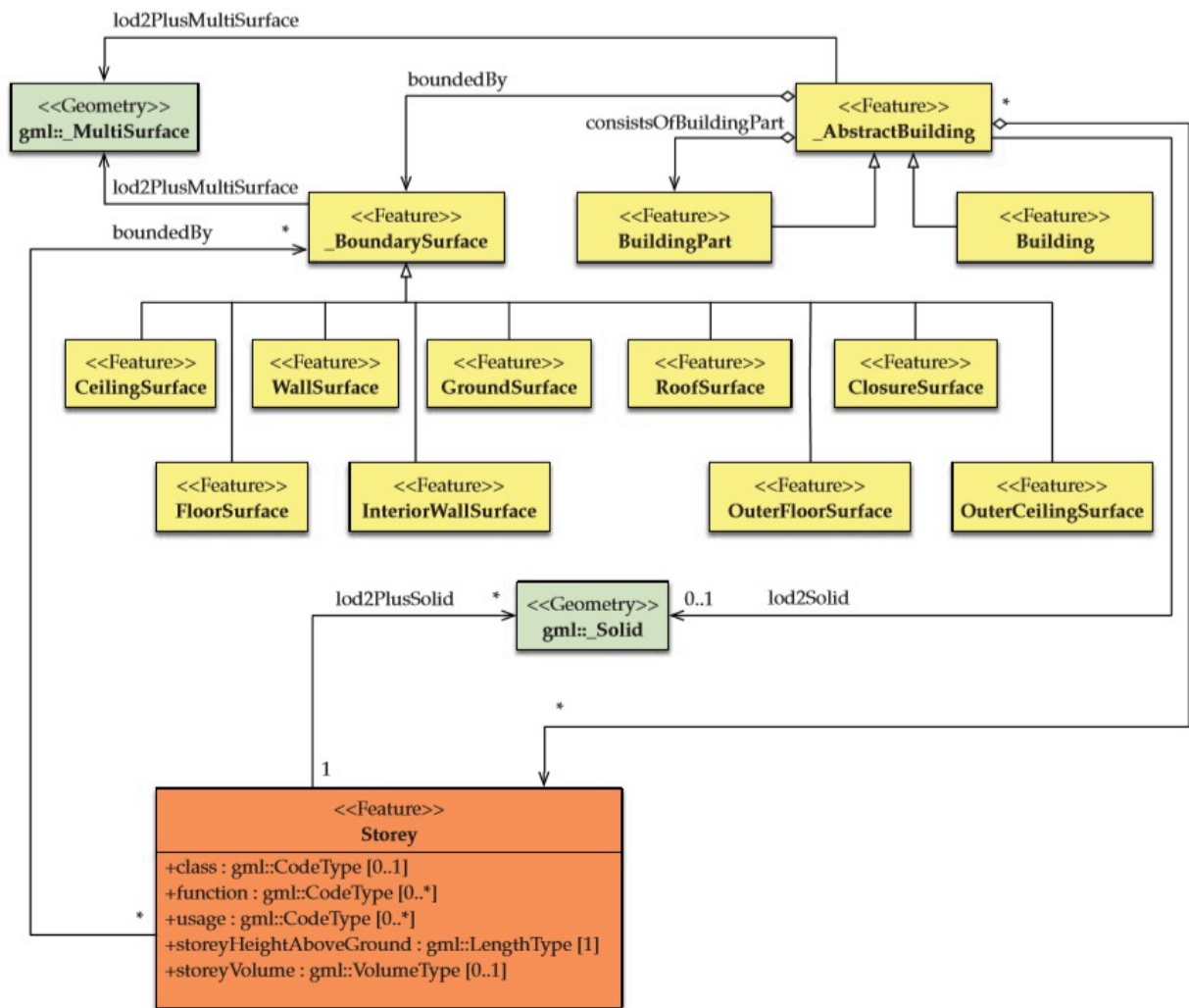


Fig. 11 : Présentation du modèle CityGML LoD3 (ou LoD2+) où chaque élément d'architecture (objet) est annoté du mot-clé « <<Feature>> »  
(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2015.1072201>)

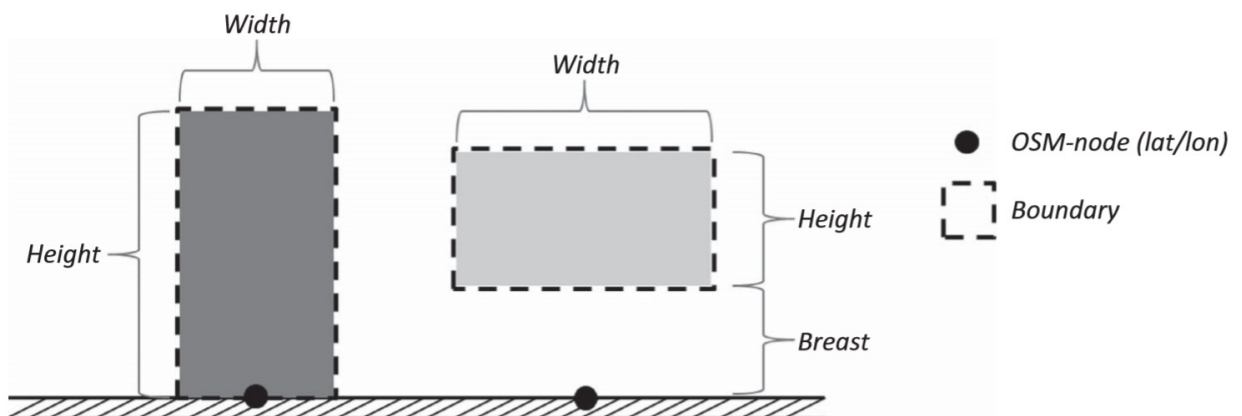


Fig. 11 : Des données « IndoorOSM » relatives à une ouverture

(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2012.721552>)

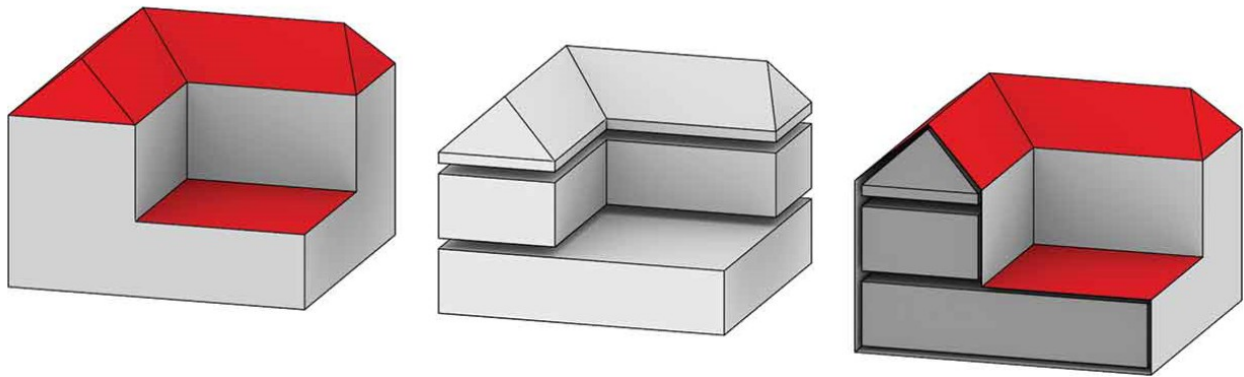


Fig. 12 : A droite, le modèle LoD3 (ou LoD2+) d'un bâtiment et à gauche, le modèle LoD2 du même bâtiment ; au milieu, on a représenté la structure intérieure des étages du bâtiment qui illustre la principale différence entre les 2 modèles

(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2015.1072201>)

#### e) Cas de LoD4

Pour générer un modèle LoD4, on doit modéliser l'intérieur de chacun des bâtiments de la zone d'intérêt (c'est à dire l'ensemble des pièces présentes à chaque étage), en plus de leur façade extérieure. C'est la différence fondamentale du modèle LoD4 par rapport au modèle LoD3 (voir figure 14), qui ne se contente que de modéliser la façade extérieure des bâtiments.

Il faudrait donc disposer en plus de photographies de l'intérieur des bâtiments à chaque étage, c'est à dire de l'ensemble des pièces présentes à chaque étage. Dans « IndoorOSM », une pièce est d'ailleurs définie comme un objet sémantique constitué d'un sol, d'un plafond, de murs et d'ouvertures (portes et fenêtres). Plus précisément, elle représente un espace libre fermé à l'intérieur d'un bâtiment.

Pour générer le modèle 3D d'un bâtiment en LoD4 à partir « d'IndoorOSM », on commence d'abord par identifier la géométrie des contours extérieurs de chacun de ses étages, comme dans le cas de LoD3. Ensuite, on doit identifier la géométrie des contours intérieurs au bâtiment de l'ensemble des pièces à chaque étage, en prenant en compte celle des fenêtres ou portes qui y sont présentes.

Référence : [Goetz 2012]

Sur le schéma ci-dessous, on a présenté le processus détaillé de génération du modèle 3D d'un bâtiment en LoD4 à partir « d'IndoorOSM » étape par étape :



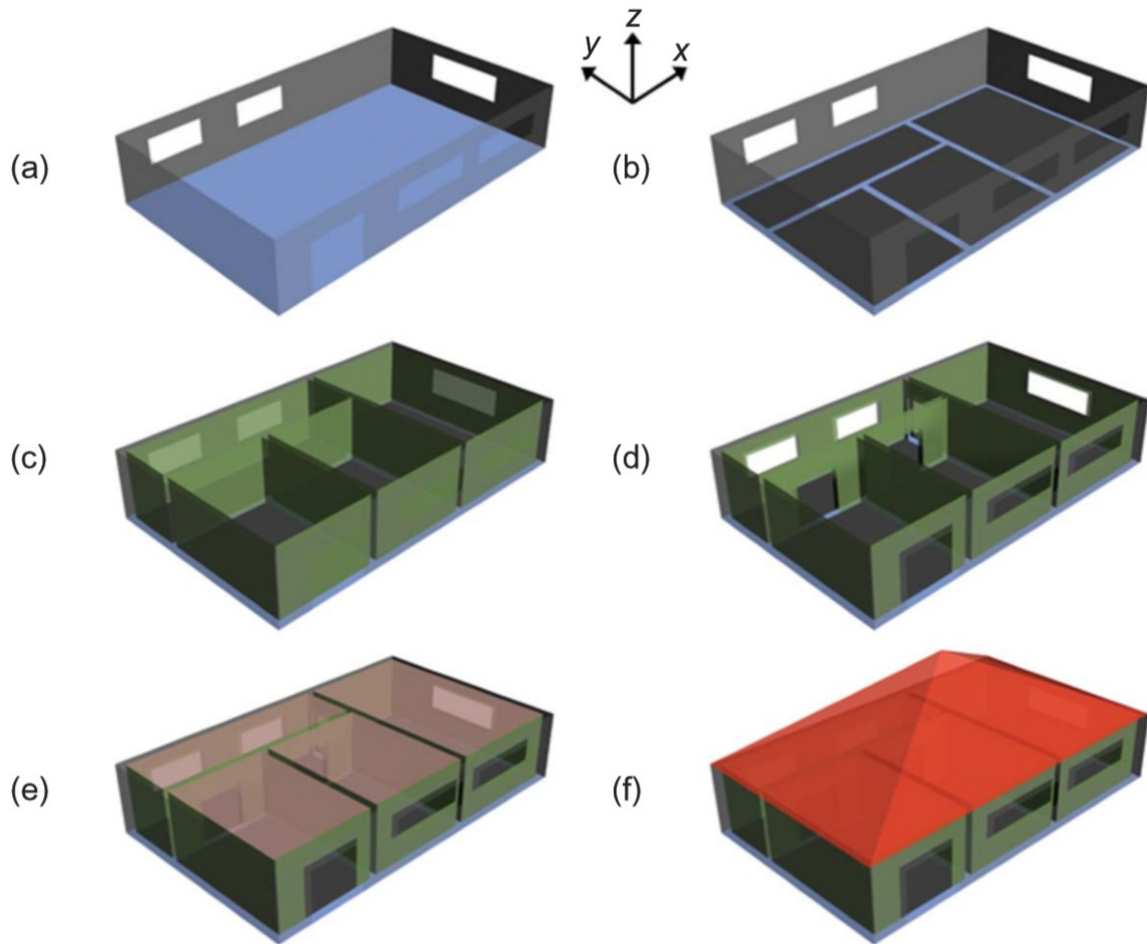


Fig. 12 : Les 6 étapes de génération du modèle 3D d'un bâtiment à 1 étage en LoD4 à partir « d'IndoorOSM » (les mots en italique correspondent aux objets du modèle CityGML associés aux éléments des bâtiments) :

- a) Le modèle 3D consiste initialement en un étage composé d'un sol, de murs extérieurs et d'ouvertures (objets *GroundSurface*, *WallSurface* et *Opening*).
- b) On obtient la structure de chacune des pièces à cet étage (notamment la surface du sol ou objet *GroundSurface* de chaque pièce) à partir des relations OSM présentes (objets *FloorSurface*).
- c) On génère ensuite les murs intérieurs (*InteriorWallSurface*) de chacune des pièces à la bonne hauteur sur chaque côté disponible des pièces.
- d) Comme dans le cas de LoD3, toutes les ouvertures (*Opening*) extérieures et intérieures présentes à l'étage courant sont ajoutées. Pour chaque ouverture intérieure présente, un objet *InteriorRing* est associé à la paire d'objets *WallSurface* correspondante (cette paire d'objets correspondant au mur commun à 2 pièces adjacentes) et pour chaque ouverture extérieure présente, un objet *InteriorRing* est associé à l'unique objet *WallSurface* correspondant.
- e) On calcule ensuite les surfaces des plafonds (*CeilingSurface*) de chacune des pièces qui sont égales aux surfaces du sol (*GroundSurface*) correspondantes. S'il existe un étage supérieur, on retourne en a). Sinon, on continue en f).
- f) Enfin, le toit (*RoofSurface*) est ajouté au sommet du bâtiment avec sa propre architecture comme dans le cas de LoD3.

(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2012.721552>)

Sur le schéma ci-dessous, on a présenté le processus général de génération du modèle 3D d'un bâtiment en LoD3 ou LoD4 à partir « d'IndoorOSM » étape par étape :

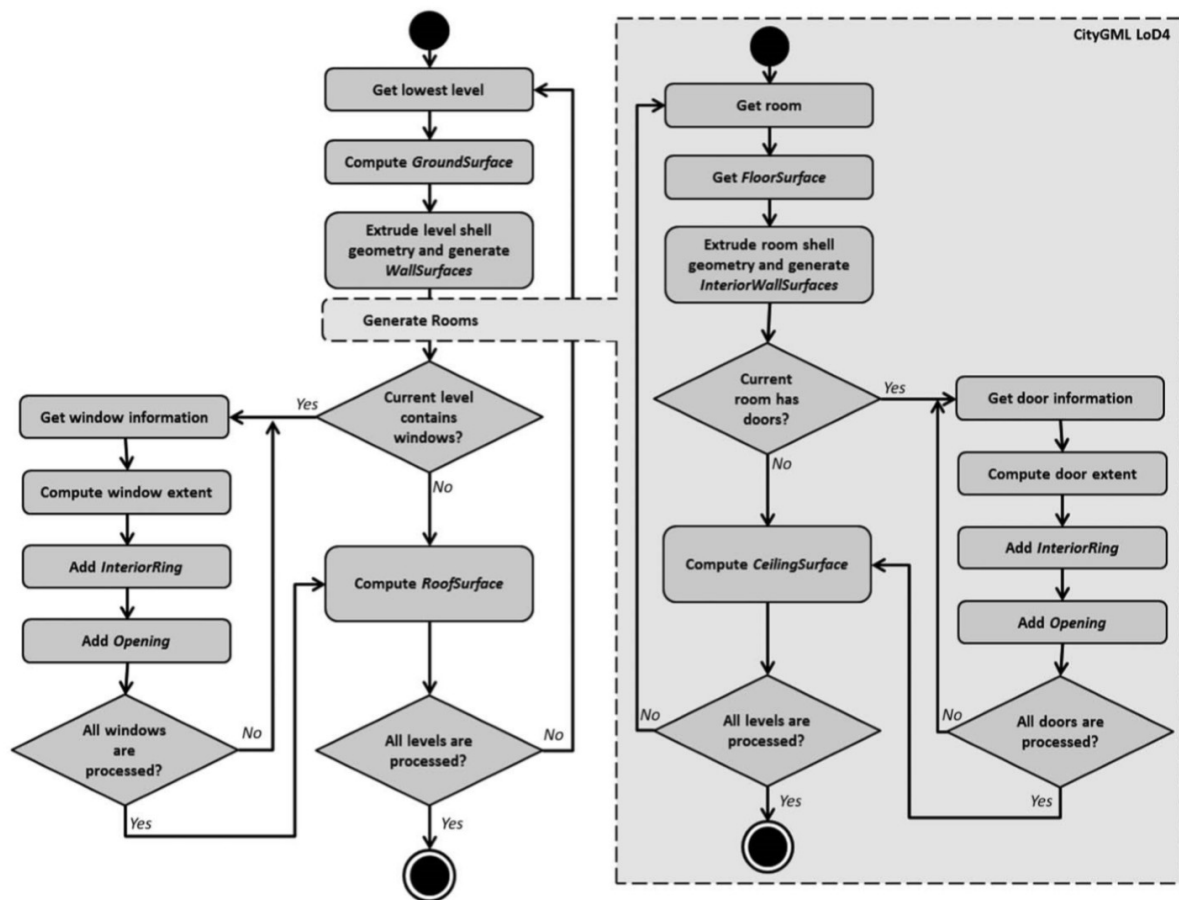


Fig. 13 :

Le diagramme de flux pour la génération du modèle 3D d'un bâtiment en LoD3 (section en dehors des pointillés) ou LoD4 (sections en dehors ainsi qu'à l'intérieur des pointillés) à partir « d'IndoorOSM », ou objets CityGML.

(source : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13658816.2012.721552>)

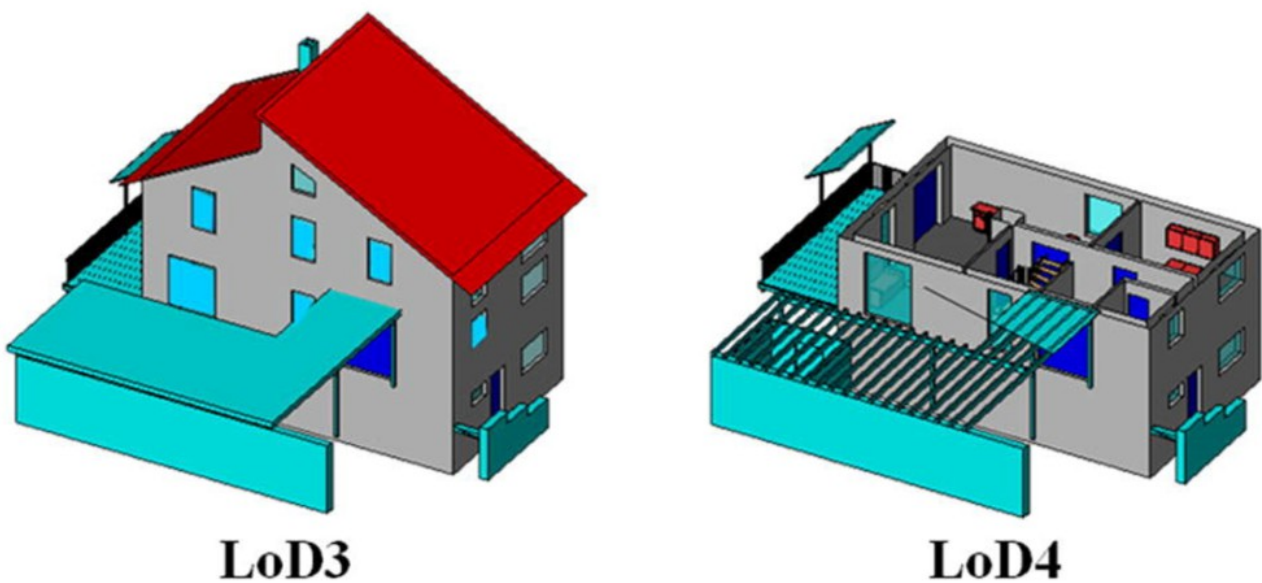


Fig. 14 : Illustration des différences de détails entre les modèles LoD3 et LoD4 d'un bâtiment  
(source : <https://pdfs.semanticscholar.org/b1ae/4d5c80ede15405ad5820ee1dbf7848c67454.pdf>)

## 2/ Méthodes ne connaissant pas la hauteur des bâtiments

Comment peut-on modéliser des bâtiments lorsqu'on ne connaît pas leur hauteur d'avance, c'est à dire lorsque cette information ne peut ni être extraite d'OSM, ni être entrée par l'utilisateur ? Il y a 2 possibilités : soit on utilise des métriques de calcul approximatif de la hauteur à partir de données cadastres, géométriques ou démographiques/socio-économiques sur les bâtiments, pour ensuite modéliser ces derniers dans un certain niveau de détail en appliquant l'un des algorithmes de reconstruction vus à la section précédente ; soit on modélise les bâtiments sans utiliser l'information sur leur hauteur, ce qui est possible en utilisant des photographies de la façade extérieure et/ou de l'intérieur des bâtiments (les bâtiments ont évidemment la bonne hauteur sur les photographies) importées depuis OSM ou par l'utilisateur lui-même.

Dans le premier cas, on observe les valeurs des attributs (cadastres, géométriques ou démographiques/socio-économiques) d'un certain nombre de bâtiments dont on connaît déjà la hauteur dans une zone urbaine ou ville donnée pour essayer de prédire la hauteur d'un bâtiment pris au hasard. Le modèle de prédiction contient un ensemble de données (ou bâtiments) de test dont on cherche à prédire la hauteur à partir des valeurs de leurs propres attributs, et d'entraînement (les bâtiments dont on connaît déjà la hauteur) : c'est le principe de l'apprentissage.

Référence : [Biljecki 2017]

Source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516302617>

On commence par présenter les 3 métriques de calcul approximatif de la hauteur à partir de données cadastres, géométriques puis démographiques/socio-économiques sur les bâtiments :

### a) A partir de données cadastres

Les données cadastres sont les attributs relatifs aux bâtiments, en nombre de 4: le nombre d'étages, le type, l'âge (ou date de construction) et la surface interne nette, qui correspond à la surface totale de sol habitable dans un bâtiment, c'est à dire à la somme des surfaces de sol habitable de chaque étage.

D'après les résultats des modèles de prédiction utilisant des attributs cadastres, on montre de façon générale que :

- Plus le nombre d'étages d'un bâtiment est important, plus sa hauteur est importante.
- Les bâtiments résidentiels (comme les maisons) ont souvent une plus petite hauteur que les bâtiments non résidentiels (comme les bureaux, les locaux d'entreprises ou encore les monuments).
- Les bâtiments les plus vieux tendent à avoir une plus grande hauteur que les bâtiments les plus jeunes.
- Plus la surface interne nette d'un bâtiment est importante, plus sa hauteur est importante : ceci étant du au fait que les bâtiments les plus larges sont aussi parmi les plus hauts.

Si pour chacun des bâtiments d'une zone urbaine ou ville, une partie de leurs attributs cadastres sont déjà connus (c'est à dire présents sur OSM), on peut alors essayer de prédire leur hauteur (à la condition que la hauteur d'une partie des bâtiments est aussi déjà connue). Malheureusement, les

attributs cadastres des bâtiments, à l'exception du nombre d'étages et du type, sont souvent absents d'OSM ; ce qui rend difficile la création de modèles de prédiction à partir de si peu d'attributs cadastres pour chaque bâtiment. On pourrait cependant demander à l'utilisateur d'entrer les valeurs des attributs cadastres et de les fournir à notre modèle, mais la méthode de reconstruction devient alors semi-automatique.

Par ailleurs, les mesures de hauteur de bâtiments produites par ces modèles ont souvent une marge d'erreur trop importante en moyenne (supérieure à 5 mètres), et des cas simples mais pourtant si courants dans la réalité ne sont pas correctement traités : par exemple, une église ne s'étend que sur un seul étage mais peut être 25 fois plus haute qu'un simple bâtiment résidentiel à aussi un seul étage).

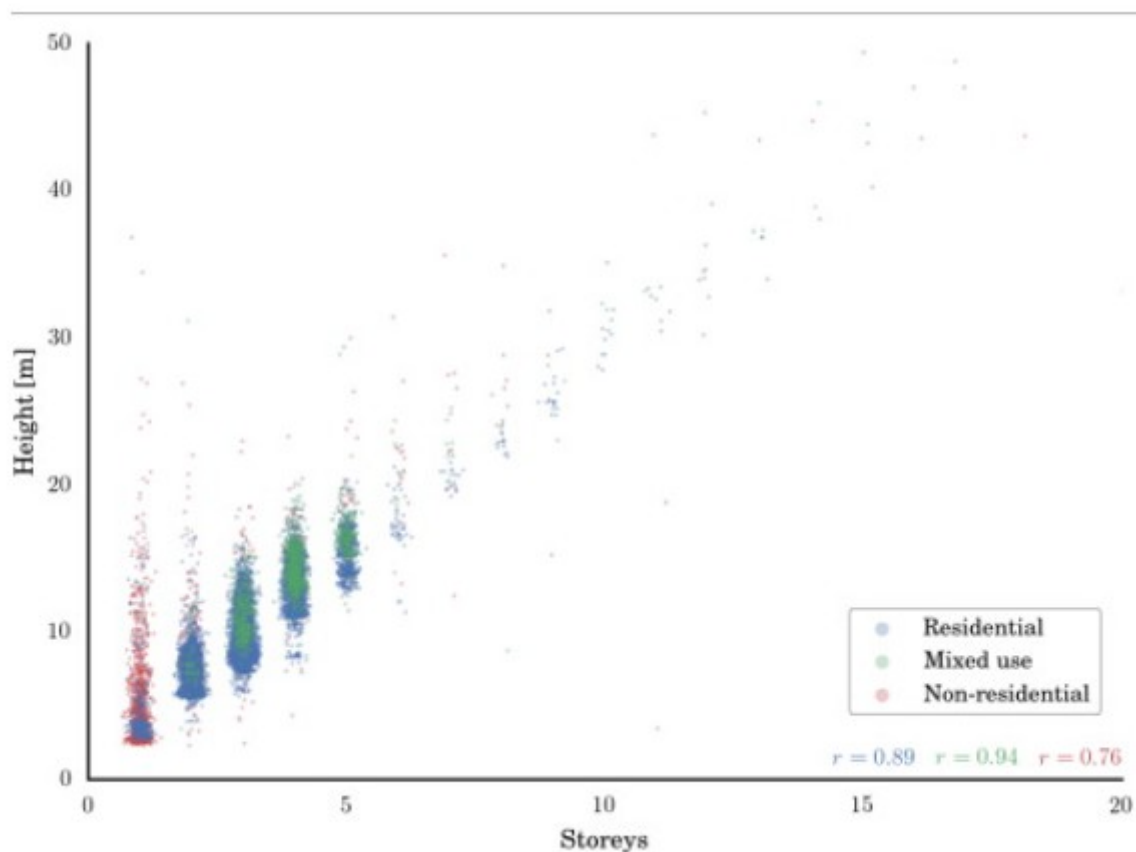


Fig. 14 : La relation entre le nombre d'étages et la hauteur dans un échantillon de 200 000 bâtiments à Rotterdam, dont la couleur représente le type de bâtiment (résidentiel, non-résidentiel ou à usage mixte). Les valeurs  $r$  correspondent aux coefficients de corrélation associés à chaque sous-groupe de couleur.

(source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516302617>)



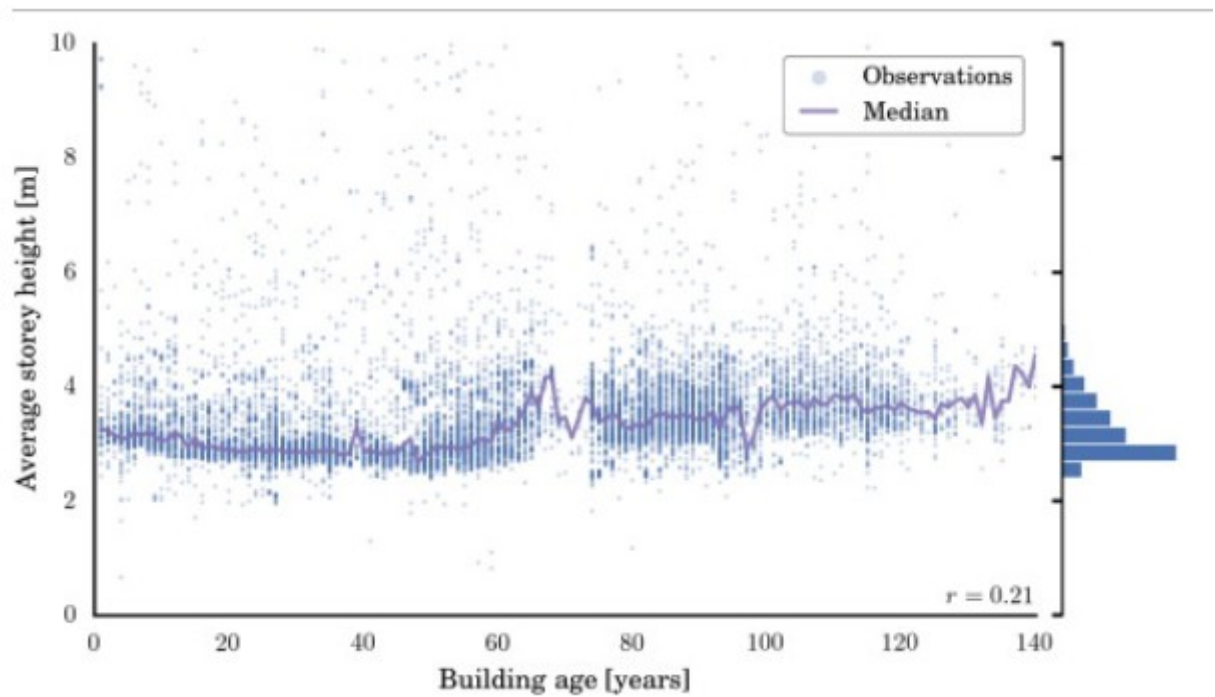


Fig. 15 : La relation entre l'âge et la hauteur moyenne des étages dans un échantillon de 200 000 bâtiments à Rotterdam. La courbe médiane est ici calculée en fonction des valeurs des observations. Le coefficient de corrélation  $r$  a également été calculé.

Ce graphique permet d'obtenir une estimation de la hauteur des bâtiments de la zone d'intérêt en multipliant la hauteur moyenne des étages par le nombre d'étages pour chaque bâtiment.

(source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516302617>)

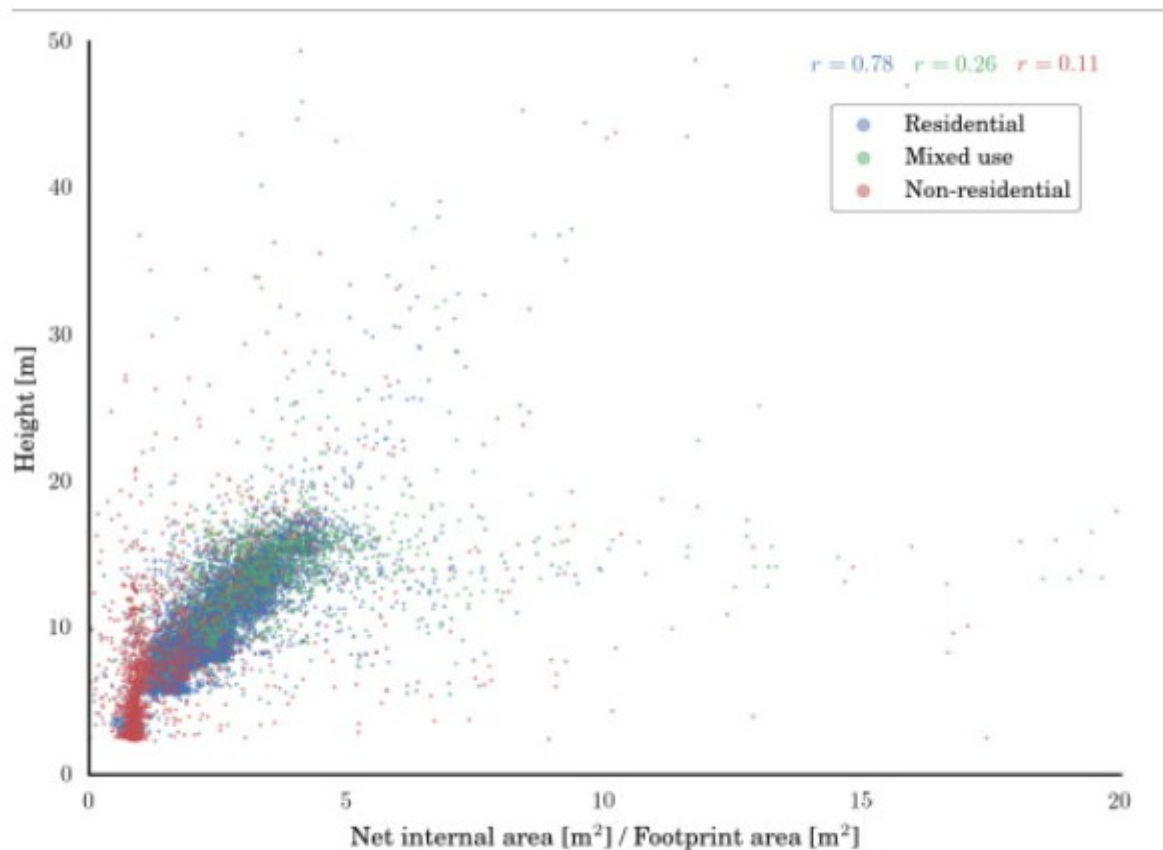


Fig. 16 : La relation entre la surface interne nette et la hauteur dans un échantillon de 200 000 bâtiments à Rotterdam, dont la couleur représente le type de bâtiment (résidentiel, non-résidentiel ou à usage mixte). Les valeurs  $r$  correspondent aux coefficients de corrélation associés à chaque sous-groupe de couleur.

(source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516302617>)

## b) A partir de données géométriques

Une autre solution serait d'utiliser les propriétés géométriques des bâtiments, qui peuvent être calculées facilement à partir d'OSM. Ces propriétés géométriques sont en nombre de 3 : l'aire de marque (dont la surface réelle correspond au rapport de la surface interne nette par le nombre d'étages), le nombre de bâtiments voisins dans un rayon donné et l'index de périmètre normalisé, correspondant au rapport du périmètre du cercle de même aire que celle du (multi-)polygone formé par la marque sur le périmètre de ce même (multi-)polygone : c'est une mesure de la compacité de la forme d'un bâtiment et il vaut  $\frac{2\sqrt{\pi A}}{P}$  où  $A$  est l'aire du (multi-)polygone et  $P$  son périmètre.

Les valeurs de l'index de périmètre normalisé sont toujours comprises entre 0 et 1 et des valeurs proches de 0 (resp. 1) indiquent une compacité de la forme du bâtiment faible (resp. forte).

D'après les résultats des modèles de prédiction utilisant des attributs géométriques, on montre de façon générale que :

- Plus l'aire de marque d'un bâtiment est importante, plus sa hauteur est importante : c'est le même raisonnement que dans le cas de la surface interne nette.
- Les bâtiments les plus bas ont souvent plus de bâtiments voisins dans un rayon donné (notamment dans un rayon de 30 mètres) que les bâtiments les plus hauts.

- La compacité de la forme d'un bâtiment, qui peut être identifiée à partir de l'index de périmètre normalisé, peut aider à identifier son type, afin d'ensuite pouvoir prédire sa hauteur (par exemple, la forme d'une église est souvent moins compacte que celle d'un bâtiment résidentiel et son architecture également plus complexe).

Le principal avantage des attributs géométriques sur les attributs cadastres est qu'ils sont accessibles depuis OSM à tout moment, et ce pour n'importe quel bâtiment. En effet, ces attributs sont en fait relatifs à OSM. Il est donc relativement simple de créer des modèles de prédiction à partir d'attributs géométriques.

En revanche, les mesures de hauteur de bâtiments produites par ces modèles ont toujours une marge d'erreur trop importante en moyenne (supérieure à 5 mètres), et les cas isolés ne sont toujours pas traités.

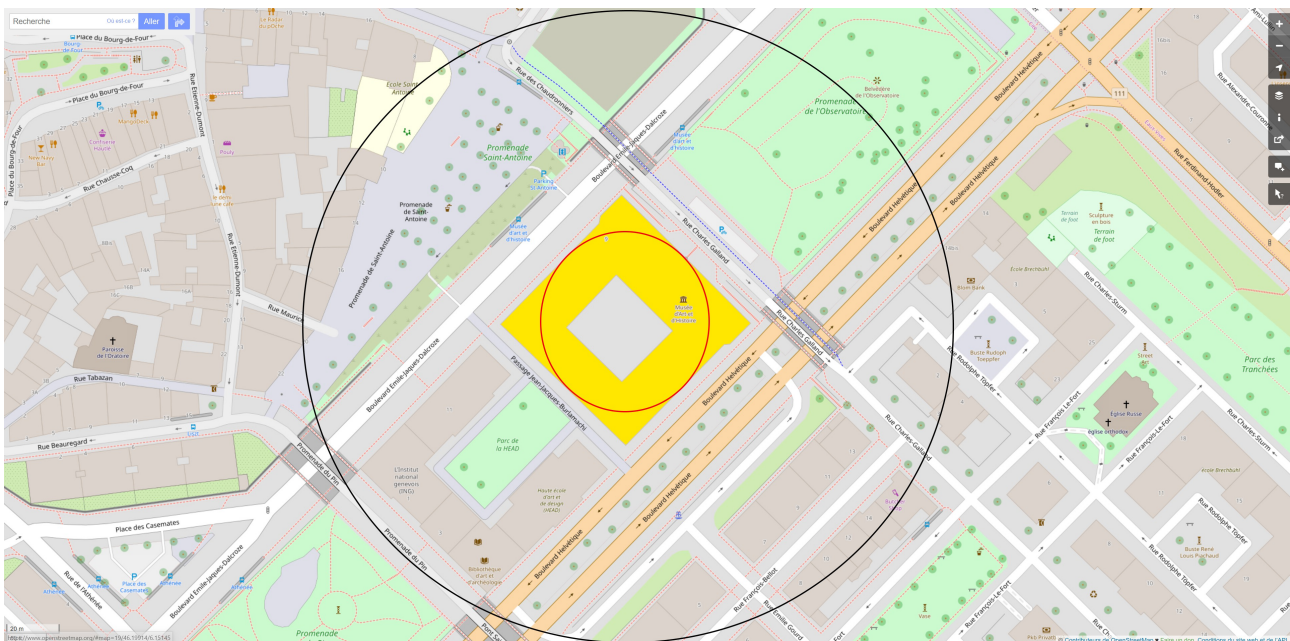


Fig. 17 : Une image d'une zone urbaine Genevoise illustrant les propriétés géométriques du bâtiment central colorié en jaune (qui est le Musée d'Art et d'Histoire de Genève). L'aire de marque du bâtiment correspond à la surface en jaune et vaut environ  $55.75\text{cm}^2$  (surface réelle de  $3500\text{m}^2$ ). Son index de périmètre normalisé correspond au rapport du périmètre du cercle rouge de même aire que la surface en jaune sur le périmètre de cette même surface et vaut environ 0.8. Enfin, le nombre de bâtiments voisins dont une partie se trouve à l'intérieur du cercle noir de rayon approximatif 128m dans la réalité est égal à 30. Notons que l'échelle choisie correspond ici à 20m pour 2.5cm sur la carte.

On voit donc qu'il est facile d'analyser les propriétés géométriques d'un bâtiment à partir d'OSM. (source: <https://www.openstreetmap.org/#map=19/46.19914/6.15145>)

### c) A partir de données démographiques et socio-économiques

On pourrait aussi utiliser les attributs démographiques et socio-économiques d'une zone urbaine ou ville donnée afin d'essayer de prédire la hauteur de l'ensemble des bâtiments qui y appartiennent. Ces attributs sont en nombre de 3 : la densité de population (paramètre démographique), la taille moyenne des ménages (paramètre sociétal) et le revenu total (paramètre économique).

D'après les résultats des modèles de prédiction utilisant des attributs démographiques ou socio-économiques, on montre de façon générale que :

- Plus la densité de population d'une zone urbaine ou ville est importante, plus leurs bâtiments sont hauts : c'est un fait logique, les immeubles dans les grandes villes peuplées sont souvent très hauts.
- On obtient la même conclusion dans le cas de la taille moyenne des ménages ou du revenu total. En effet, une taille de ménages importante implique généralement un besoin de construire des bâtiments aussi hauts que possible, afin d'héberger le maximum de citoyens. De même, un revenu total important indique qu'une ville a généralement les moyens financiers de construire des bâtiments aussi hauts que possible.

Les attributs démographiques et socio-économiques d'une zone urbaine ou ville sont généralement accessibles en ligne. Cependant, ils présentent trop d'inconvénients pour qu'ils soient considérés comme utiles dans la création de modèles de prédiction : premièrement, les modèles utilisant ce type d'attribut s'appliquent principalement aux zones résidentielles, puisqu'on considère des populations. Deuxièmement, à cause de la nature des attributs considérés, on peut prédire la hauteur moyenne de l'ensemble des bâtiments dans une zone urbaine ou ville donnée mais pas la hauteur individuelle des bâtiments. Dernièrement, la plupart des zones urbaines ou villes contiennent à la fois de hauts et bas bâtiments, ce qui empêche une prédiction généralisée de la hauteur des bâtiments.

Néanmoins, il est possible d'utiliser ce type d'attributs en conjonction avec les attributs cadastres et/ou géométriques des bâtiments afin de créer des modèles de prédiction de la hauteur aussi précis que possible.

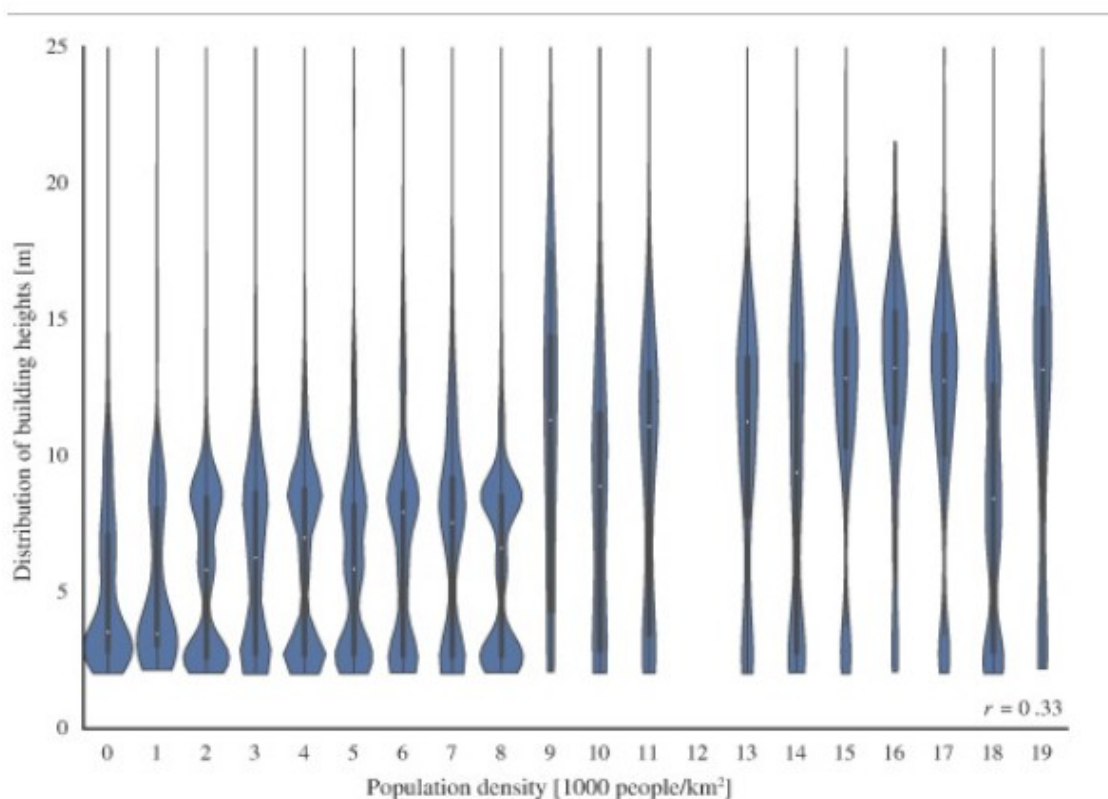


Fig. 18 : « Violin plots » (Hintze & Nelson, 1998) indiquant la distribution des hauteurs par classe de densité de population dans le voisinage dans lequel les bâtiments sont situés (parmi notre



échantillon de 200 000 bâtiments à Rotterdam). Les petits points en blanc représentent la valeur médiane de toutes les hauteurs de bâtiments dans la même classe de densité de population. Le coefficient de corrélation  $r$  a également été calculé.  
(source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516302617>)

	Predictors										Accuracy [m]	
	Cadastre				Geometry			Census				
#	S	U	A	NIA	FA	NPI	N	PD	AHS	I	MAE	RMSE
1	•										1.3	2.1
2	•	◦									1.3	2.2
3	•	◦	•								1.1	2.0
4				•							1.7	3.4
5	•	◦	•	•							1.0	2.0
6		•	•	•							1.8	4.0
7					•						2.3	4.2
8					•	•	•				1.8	3.5
9	•	◦	•	•	◦	◦	◦				0.9	1.9
10				•	•						1.3	2.6
11				•	•	•	•				1.1	2.5
12	•				•	•	•				1.1	2.0
13			•		•	•	•				1.4	3.2
14								•	•	•	3.1	4.3
15					•	•	•	•	•	•	1.3	2.9
16	•	◦	•	•	◦	◦	◦	◦	◦	◦	0.8	1.8
17	•		•	•							0.8	1.8

Legend: S—storey, U—use, A—age, NIA—net internal area, FA—footprint area, NPI—normalised perimeter index, N—neighbours, PD—population density, AHS—average household size, I—income.

The sign ◦ denotes that a feature was used but in this particular combination it turned out to be marginally relevant for the RF regressor. Fig. 9 illustrates the predictor importance in more detail.

Fig. 19 : Un tableau présentant des modèles de prédiction (les données d'entraînement correspondant à un échantillon de 200 000 bâtiments à Rotterdam) basés sur une combinaison de plusieurs attributs (cadastres, géométriques ou démographique/socio-économiques). 17 modèles de prédiction sont ici entraînés et pour chacun d'entre eux, on évalue la précision des mesures de la hauteur effectuées en utilisant comme métriques d'erreur : MAE (erreur absolue moyenne) et RMSE (erreur quadratique moyenne).

Comme les attributs ne sont souvent pas tous disponibles, ces modèles de prédiction peuvent s'avérer utiles.

(source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516302617>)



Fig. 20 : Ensemble de 16 graphiques illustrant l'importance de chaque attribut relativement aux 16 modèles de prédiction de la figure précédente (excluant le dernier), ainsi que leur performance pour la prédiction de la hauteur des bâtiments. La précision de chaque modèle est représentée par la valeur de la hauteur de la partie grisée, où chaque ligne horizontale correspond à une erreur d'un demi-mètre.

D'après nos observations : le nombre d'étages, l'âge et la surface interne nette des bâtiments sont les attributs les plus utiles pour la prédiction de la hauteur. Autrement dit, les attributs cadastres sont les plus utiles et devraient être priorités lorsque disponibles. C'est pourquoi le modèle 17 de la figure précédente a combiné ces 3 attributs cadastres pour obtenir une erreur MAE de seulement 0.8

(source : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971516302617>)

#### d) A partir de photographies

Pour reconstruire un modèle 3D de bâtiment en LOD3 à partir de photographies de sa façade extérieure, il faudrait disposer d'au moins un cliché de chacune des faces extérieures du bâtiment. Une face extérieure du bâtiment correspond sur OSM à un côté de l'un des polygones formé par la marque de ce bâtiment (rappelons qu'une marque de bâtiment peut aussi former un ensemble de polygones, au lieu d'un unique polygone).

A partir d'un ou plusieurs cliché(s) d'une face extérieure donnée, il pourrait être possible de créer une vue de cette face depuis n'importe quelle position du terrain suffisamment proche du bâtiment (et faisant partie de l'angle visuel de la face) dans notre modèle. Pour ce faire, on pourrait effectuer des opérations sur l'une des images de la face extérieure en question directement dans notre modèle, qui permettent alors d'en modifier la perspective (par exemple, une modification de la distance focale et/ou une rotation autour du bâtiment impliquerait une modification de la forme et/ou de la taille de la face du bâtiment dans notre modèle). En appliquant cette technique pour chacune des faces extérieures du bâtiment, on obtient ainsi une vue générale de ce bâtiment depuis n'importe quelle position du terrain dans notre modèle.

On pourrait également utiliser des photographies de l'intérieur de chaque étage d'un bâtiment pour essayer de reconstruire le modèle 3D de ce bâtiment en LoD4. Malheureusement, il est difficile d'avoir accès à des photographies de l'intérieur des bâtiments sur OSM ou en ligne. Cependant, on pourrait autoriser l'utilisateur à importer ses propres clichés de l'extérieur et/ou de l'intérieur des bâtiments dans notre modèle.

Source : <https://blog.mapbox.com/mapping-3d-building-features-in-openstreetmap-7685ee12712a>

### III/ Conclusion

Dans la première partie, nous avons étudié les méthodes connaissant la hauteur des bâtiments (depuis OSM ou les données entrées par l'utilisateur) : c'est à dire les algorithmes de reconstruction utilisés pour chaque niveau de détail de LoD0 à LoD4. Dans la seconde partie, nous avons étudié les méthodes ne connaissant pas la hauteur des bâtiments : c'est à dire les modèles de prédiction de la hauteur utilisant les données cadastrales, géométriques ou démographiques/socio-économiques des bâtiments ; ainsi que la reconstruction à partir de photographies de l'extérieur et/ou de l'intérieur des bâtiments.

Nous avons constaté que ces méthodes de reconstruction ne pouvaient pas être complètement automatiques : des données sur les bâtiments (notamment leur hauteur ou autre attribut cadastre) ou des photographies de l'extérieur et/ou de l'intérieur des bâtiments doivent toujours pouvoir être fournies par l'utilisateur. En effet, le cas idéal où la hauteur de chaque bâtiment d'une zone urbaine ou ville donnée peut être extraite depuis OSM est extrêmement rare. Évidemment, le but est de rendre notre modèle aussi automatique que possible, car il peut être fastidieux pour l'utilisateur d'entrer les données une par une.

La reconstruction d'un modèle 3D CityGML de bâtiments à partir d'OSM n'est pas une tâche aisée, et il convient donc de choisir les méthodes de reconstruction les mieux adaptées, tout en produisant un modèle qui soit le plus précis possible. Par la suite, nous montrerons que l'implémentation d'un tel modèle est possible et nous expliquerons plus en détails les méthodes de reconstruction que nous jugeons les meilleures parmi celles présentées précédemment.

## IV/ Références

- [Zlatanova&al. 2013] I.Buyuksaliha, U.Isikdagb, S.Zlatanova. 2013. **Exploring the processes of generating LoD (0-2) CityGML models in greater municipality of Istanbul.** In the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-2/W2, ISPRS 8th 3DGeoInfo Conference & WG II/2 Workshop, 27 – 29 November 2013, Istanbul, Turkey
- [Goetz 2012] Marcus Goetz. 2012. **Towards generating highly detailed 3D CityGML models from OpenStreetMap.** In the International Journal of Geographical Information Science, Vol. 27, Issue 5, pp. 845-865, 2013
- [Rumpler&al. 2012] Markus Rumpler, Arnold Irschara, Andreas Wendel, Horst Bischof. 2012. **Rapid 3D city model approximation from publicly available geographic data sources and georeferenced aerial images.** In the 17<sup>th</sup> Computer Vision Winter Workshop, 1-3 February 2012, Slovenia
- [Martel&al. 2019] Roman Martel, Chaoqun Dong, Kan Chen, Henry Johan, Marius Erdt. 2019. **Generation of 3D building models from city area maps.** In the 14<sup>th</sup> International Joint Conference of Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, 2019
- [Boeters&al. 2015] Roeland Boeters, Ken Arroyo Otori, Filip Biljecki, Sisi Zlatanova. 2015. **Automatically enhancing CityGML LoD2 models with a corresponding indoor geometry.** In the International Journal of Geographical Information Science, Vol. 29, Issue 12, pp. 2248-2268, 2015
- [Biljecki 2017] Filip Biljecki, Hugo Ledoux, Jantier Stoler. 2017. **Generating 3D city models without elevation data.** Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 64, pp. 1-18, July 2017
- [Zipf&Fan 2016] Alexander Zipf, Hongchao Fan. 2016. **Modelling the world in 3D from VGI/crowdsourced data.** In the European Handbook of Crowdsourced Geographic Information, pp. 435-446, August 2016