

# Maquette Numérique d'une rue du vieux Bayonne pour son étude thermique par éléments finis.

Jairo Acuña Paz y Miño, Vincent Lefort, Claire Lawrence, Benoit Beckers  
UPPA Université de Pau et des Pays de l'Adour – ISA BTP, Anglet, France  
Urban Physics Joint Laboratory

...

e-mail : [j.acuna@univ-pau.fr](mailto:j.acuna@univ-pau.fr)

## Abstract

The work presented here has consisted in the *construction* of a 3D model in a street of the Petit Bayonne, capable of reproducing in a simple but precise way the complex characteristics of the urban scene that could be used to calibrate thermal simulations.

In order to achieve thermal simulation, it is necessary to use a finite element method. This generates specific questions concerning the geometry of the scene, meshing choices and model semantics. 3D models designed to study radiation phenomena, whether heat or daylight, pay particular attention to the level of detail and geometric quality.

This 3D model, consisting of "*building blocks*", represents building elements oriented towards semantic objects.

## Key words

Thermography, finite elements, mesh generation, 3D modelling, semantic building model.

## Résumé

Le travail présenté ici a consisté en la *construction* d'un modèle 3D dans une rue du "Petit Bayonne", capable de reproduire de manière simple mais précise les caractéristiques complexes de la scène urbaine qui pourrait ensuite être utilisée pour calibrer les simulations thermiques.

Pour réaliser la simulation thermique, il est nécessaire d'utiliser une méthode par éléments finis. Ceci génère des questions spécifiques concernant la géométrie de la scène, les choix de maillage et la sémantique du modèle. Les modèles 3D conçus pour étudier les phénomènes de rayonnement, qu'il s'agisse de la chaleur ou de la lumière du jour, accordent une attention particulière au niveau de détail et à la qualité géométrique.

Ce modèle 3D, constitué principalement de "*blocs de construction*", représente des éléments de construction orientés vers des objets sémantiques.

## **Mots clefs**

Thermographie, éléments finis, génération de maillage, modélisation 3D, modélisation sémantique du bâtiment.

# 1. Introduction

L'objectif de ce travail est de construire un modèle 3D capable de reproduire de manière simple mais précise les caractéristiques complexes de la scène urbaine, afin de réaliser des simulations thermiques dans un code de calcul par éléments finis.

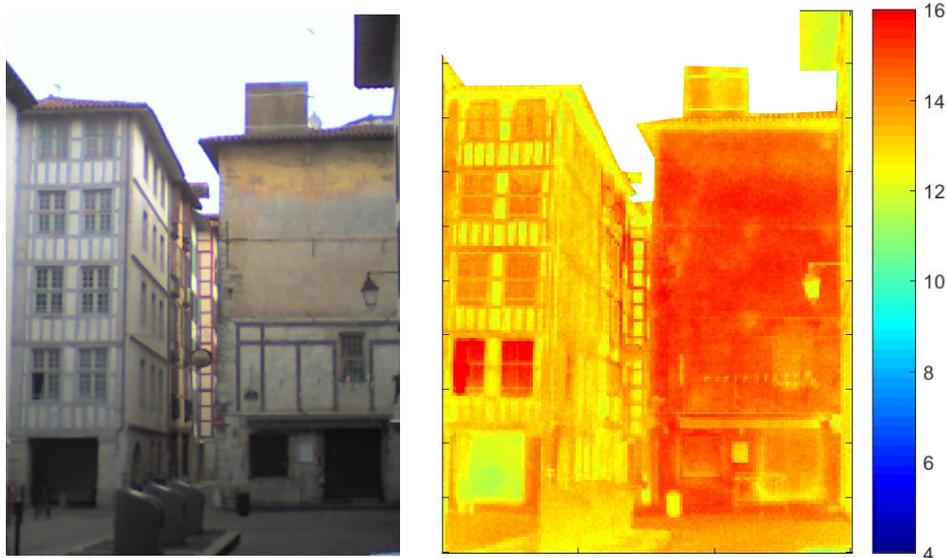


Figure 1. Rue des Tonneliers, Bayonne 23 avril 2017 (9h30) Thermographie Extérieure.

Comme l'acquisition de données 3D est de plus en plus accessible (avec les progrès technologiques et la baisse des prix) et leur traitement par des logiciels de plus en plus performants, leur utilisation dans différentes applications pratiques sur chantier ou scientifiques est donc plus fréquente. Cependant, il est important de définir leur usage dès le départ afin d'éviter d'être surchargé d'éléments inutiles, et il n'est pas nécessaire de modéliser tout le nuage de points en *Building Information Modeling* (BIM). Mais malgré les progrès, une part des traitements est toujours faite manuellement, en fonction des applications visées.

Nous présenterons ici notre travail sur les modèles 3D à l'échelle urbaine, destinés à l'étude des rayonnements thermiques, à partir du cas d'étude de la rue des Tonneliers à Bayonne (64), en discutant le niveau de détail requis et la qualité géométrique selon nos besoins.

## 2. De la visualisation 3D aux modèles 3D

Depuis l'origine, la modélisation 3D a eu pour principal objectif la visualisation et l'interaction entre l'être humain et l'ordinateur [SUTHERLAND, 1968].

La différence entre la réalité virtuelle ou l'infographie 3D et la modélisation 3D urbaine provient de la sémantique. On ne modélise pas de la même manière une scène urbaine pour le rendre réaliste et pour la simulation physique. [CLARK et al., 1976] Les modèles 3D de scènes urbaines, en plus des aspects spatiaux et géométriques, comprennent une structure sémantique qui inclut différents attributs et leurs interrelations. Cela nous rapproche du domaine BIM [SENAVE, et al., 2015] et des processus Architecture/Engineering/Construction et Computer-aided architectural design (CAAD) où chacun de ses objets est représenté par ses propriétés tridimensionnelles et leurs interrelations. [KOLBE, 2009].

La modélisation des scènes urbaines représente généralement une tâche ardue, dans laquelle on cherche à représenter avec précision les environnements complexes créés par l'homme.

Une ville se compose de milliers de bâtiments, ce qui représente une difficulté lorsqu'il s'agit de la modéliser, même partiellement, d'autant plus que l'information nécessaire pour construire le modèle est souvent inaccessible, rare ou inexistante. [PRÉVOT, et al., 2011].

Lorsque nous nous référons au niveau de détail (LoD) d'un modèle urbain, nous prenons en compte la quantité d'informations qu'il contient, ses caractéristiques visuelles et sa complexité géométrique, mais aussi et surtout sa sémantique et sa richesse dans le détail [GRÖGER et al., 2012] et il existe une relation entre le modèle 3D et les informations nécessaires pour sa construction, dépendante de son LoD.

Le LoD est généralement le point de référence pour spécifier l'aptitude d'un modèle 3D, [LUEBKE, et al., 2003] mais ce n'est qu'un des aspects à considérer lors de la modélisation d'une scène urbaine. D'un point de vue géométrique, plusieurs variantes du même modèle 3D sont possibles, au sein d'un même niveau de détail [BILJECKI et al., 2017].

Les modèles 3D conçus pour étudier les phénomènes de rayonnement, qu'il s'agisse de chaleur ou d'éclairage naturel, accordent une attention particulière au niveau de la sémantique et à la qualité géométrique. En termes de simulation d'énergie solaire, la définition du niveau de détail (LoD) optimal à l'échelle du quartier n'est pas un problème simple et la plupart des approches sont faites en partant d'un point de vue empirique [BESUIEVKSY et al., 2016].

### **3. Différentes modélisations 3D**

La modélisation géométrique des scènes urbaines se confronte à deux défis majeurs: (i) l'acquisition de toute l'information nécessaire sur l'environnement urbain à modéliser; et (ii) le traitement, l'édition et la production du modèle tridimensionnel.

Alors que certaines applications tolèrent certaines approximations géométriques, d'autres ne tolèrent que des modèles précis [ALIAGA, 2013].

En termes d'acquisition et de traitement, la méthode la plus simple pour la construction d'un modèle 3D est peut-être l'extrusion de polyèdres à partir d'une empreinte au sol jusqu'à une hauteur mesurée. La norme CityGML définit ce modèle de type boîte avec un toit plat, comme un LoD1. C'est l'un des LoD les plus utilisés car, malgré son niveau de détail simple, ces modèles contiennent une grande quantité d'information utile pour de multiples applications. Cette méthode a été catégorisée par Aliaga en tant que « *modélisation interactive* ». Elle est forcément hautement manuelle et a été très employée. Les résultats continuent d'être utilisés aujourd'hui. Malgré son apparente simplicité, il faut noter la difficulté de produire ou de trouver des ensembles de données contenant des informations sur les hauteurs d'une scène urbaine, ce qui retarde, entrave ou nuit à la production de modèles 3D urbains.

D'autre part, Aliaga détermine la méthode de reconstruction, qui fonctionne à partir d'algorithmes automatiques qui traitent une grande quantité d'informations obtenues par des scanners et des images aériennes ou terrestres. Cette méthode parvient à générer des nuages de points avec des informations géométriques de la scène et un code de couleur RGB. Ceci permet de différencier les matériaux, les textures et les couleurs entre autres. Cependant, cette

méthode se concentre principalement sur la reconstruction d'espaces 3D. Il n'est donc pas possible d'obtenir automatiquement un modèle structuré.

Enfin, la méthode de modélisation procédurale est basée sur la répétitivité de l'espace urbain. et cherche à construire des modèles 3D de la ville en déterminant des règles générales. Ce sont des modèles hautement modifiables. [BESUIEVKSY et al., 2016 , ALIAGA, 2013].

## **4. Paramètres importants pour un modèle 3D à l'échelle urbaine pour des simulations thermiques**

Au-delà des principes généraux qui ont été illustrés dans les paragraphes précédent, les simulations physiques sont généralement effectuées sur des modèles CAO 3D. Et la performance des simulations dépend fortement du nombre d'éléments et de la complexité géométrique présents dans le modèle 3D. Mais le temps de simulation peut augmenter d'un facteur 10 avec le choix d'une plus petite entité géométrique [WHITE, et al., 2003].

Jusqu'à présent, les outils existants pour faire de la simulation thermique dynamique de bâtiments ou de quartiers sont tous basés sur des modèles nodaux, ce qui conduit à une simplification excessive des géométries, et est par exemple incompatible avec la simulation de thermographies. Ainsi la construction d'un modèle 3D pour faire des calculs avec des méthodes d'éléments finis (*FEM*) est nécessaire [BECKERS et al., 2017].

Aujourd'hui, de nombreux programmes de simulation énergétique pour les bâtiments sont confrontés au défi d'utiliser des modèles CAO 3D comme base pour leurs simulations. Cependant, ces modèles 3D conçus principalement pour des représentations architecturales ou visuelles, ne satisfont pas aux exigences nécessaires pour effectuer une simulation thermique [MAILE, et al., 2013]. Ces dernières années, des recherches ont été menées pour convertir la géométrie CAO 3D en « géométrie thermique » [BAZJANAC et al., 2011, HITCHCOCK et al., 2011] afin de s'en servir dans des simulations d'efficacité énergétique. Bien que ces modèles fournissent l'information nécessaire pour de nombreux calculs d'efficacité énergétique, la manière dont ils ont été construits ne permet pas d'en tirer le plein potentiel.

Pour obtenir une « géométrie thermique » optimale, différents aspects doivent être regardés simultanément :

- disponibilité de l'information géométrique nécessaire pour construire un modèle tridimensionnel de qualité, [ZHU, et al., 2018]
- disponibilité de l'information sémantique nécessaire,
- capacité d'exportation dans un code de calcul pour réaliser des simulations physiques.

Pour simuler des transferts de chaleur dans un modèle 3D, il faut connaître pour chaque élément du maillage le volume de l'élément, ses propriétés thermiques, les liens entre les éléments, et leurs surfaces de contact. (voir figure 1 et 2)

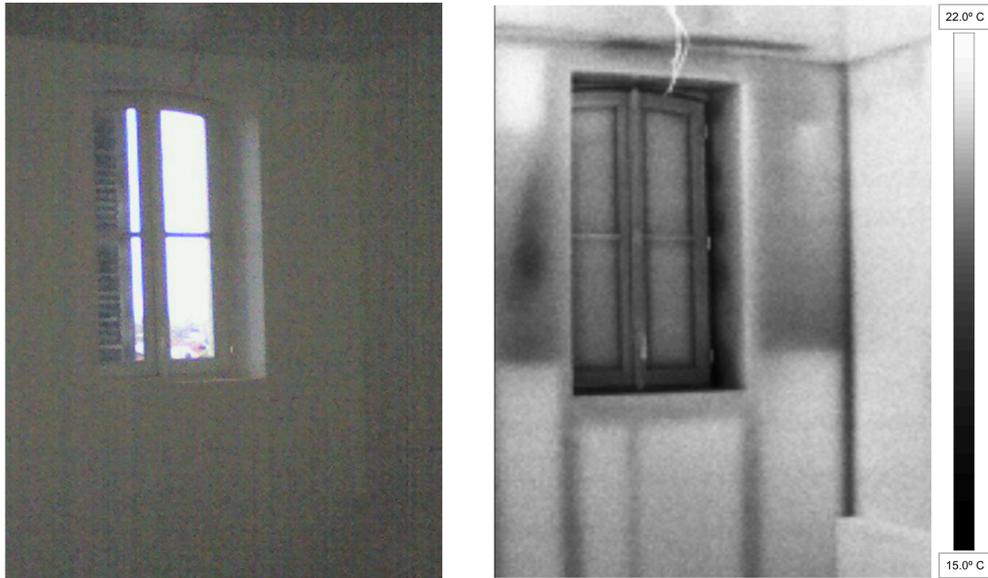


Figure 2. 19 Rue Vieille Boucherie, Bayonne 11 décembre 2017 (12h15) Thermographie Intérieur.

La méthode des éléments finis (FEM) a été largement utilisée par les ingénieurs pour différents types d'analyse, [BARAZZETTI et al., 2015] structurelle et physique. Cependant, lors de l'évaluation de structures complexes, il est souvent nécessaire de simplifier le modèle et d'éliminer les détails inutiles [CRESPI et al., 2015].

## 1. Différentes stratégies de maillage pour des calculs FEM à l'échelle urbaines

Les codes de calculs FEM actuels acceptent de nombreux types de maillage :

- mixtes ou purs (Un maillage mixte comporte différents types d'éléments - tétraèdres, prismes et pyramides, hexaèdres) ;
- structurés ou non (Un maillage est dit structuré si le nombre d'éléments partageant un même nœud est constant sur tout le maillage. Il est non structuré dans le cas contraire) ;
- conformes ou non (Un maillage est dit non-conforme si certains de ses nœuds se trouvent au milieu d'arêtes ou de faces sans être reliés aux autres éléments. Le maillage est conforme seulement si les éléments adjacents partagent un bord complet ou une face complète).

Nous nous sommes intéressés à ces derniers types et avons choisi d'étudier les maillages conformes, qui offrent une plus grande genericité et faciliteront à priori les calculs thermiques. Pour répondre à l'exigence de conformité, il existe deux grandes options : un maillage hexaédrique – réputé demander un nombre d'éléments moindre pour une meilleure qualité du calcul et une visualisation simplifiée, etc. – ou un maillage tétraédrique – réputé pouvant reproduire fidèlement des géométries complexes de une façon très automatique. Le choix de l'un ou l'autre fait l'objet de débats passionnés, aussi nous expliquerons simplement

pourquoi la sélection d'un maillage à partir d'éléments quadrilatéraux nous a paru plus pratique pour notre cas d'étude :

- vu la géométrie du bâti, les hexaèdres ont l'avantage de reconstruire avec précision des scènes urbaines en utilisant moins d'éléments, comme l'illustre la figure 3.
- Le temps de calcul lorsqu'on travaille avec de grands modèles urbains limite la capacité de manipuler le modèle, et le choix des hexaèdres, en limitant le nombre d'éléments, nous paraît pertinent.



Figure 3. La sémantique du modèle est étroitement liée à la morphologie de chaque élément dans un maillage hexaédrique

## 5. Nouveau modèle 3D pour les simulations thermiques à l'échelle urbaine

En prenant en compte que notre objectif est de simuler des scènes urbaines, pour lesquelles nous avons soit trop peu d'information (le plus souvent) soit trop lorsqu'une campagne de mesure a permis l'acquisition d'un nuage de point à l'échelle urbaine, il est nécessaire de s'assurer que les données disponibles et la complexité géométrique du modèle sont appropriées pour les simulations attendues.

Afin d'éviter les difficultés rencontrées avec des modèles complexes et les incohérences géométriques qui compliquent la conversion entre les modèles existants (CAO 3D) et la géométrie thermique et nécessitent de traiter (réparer, nettoyer et compléter) les modèles disponibles [RASSINEUX, et al., 2016], dans lesquels des erreurs empêchent l'utilisation de

certains programmes ou génèrent des écarts qui affectent la précision des résultats, nous choisissons de construire un modèle 3D simple, à partir des données cadastrales et du nuage de point de la scène.

Devant l'importance d'obtenir l'information juste nécessaire, nous proposons de créer manuellement un nouveau modèle 3D qui corresponde juste à nos besoins, en construisant un modèle de blocs hexaédriques conformes, « calqués » sur les éléments du bâtiment. Le maillage EF sera directement donné par ce modèle 3D, appuyé sur une géométrie appropriée sans approximations excessives.

Bien que le passage du nuage de point au modèle simplifié nécessite beaucoup de temps de travail [THAKUR, et al., 2009], cette méthode nous permet une grande flexibilité lors de la détermination de chacun des éléments, ce qui permet de s'approcher au plus de la réalité physique des éléments modélisés.

## 6. Étude de cas : la rue des Tonneliers à Bayonne

La rue des tonneliers, dans le « Petit Bayonne », quartier ancien de Bayonne, comprend de nombreuses maisons à pans de bois. Les colombages créent des façades très tramées, comme le montrent les photos de la figure 4.



Figure 4. Le colombage des constructions de Bayonne et leurs façades tramées

Cette trame ou grille nous donne intuitivement un découpage en éléments surfaciques puis volumiques par extrusion, selon une structure sémantique directement utilisable dans un code FEM.

Par conséquent, nous avons proposé un modèle construit manuellement qui possède les caractéristiques nécessaires pour effectuer des simulations thermiques.

# 1. Acquisition des données

Pour cette étude de cas, une campagne d'acquisition de données a été réalisée le 19 octobre 2017 avec un drone Phantom 4 pro (précision estimée 5cm) , un laser photogrammétrique mobile Pegasus BackPack Leica (précision estimée 3cm) et nous avons donc pu obtenir un nuage de point, riche de très nombreuses informations. Il faut noter que cela ne reflète pas les conditions habituelles rencontrées en modélisation à l'échelle urbaine.

Les références géométriques utilisées pour notre modèle sont donc le produit de l'information cadastrale, du balayage terrestre, du balayage aérien, de la photogrammétrie et de la prise de mesures sur site. Cela nous a permis de construire un modèle 3D géométriquement précis et sémantiquement riche. [BENNER et al., 2005]

## 2. Construction du modèle 3D

### 2.1.À l'échelle d'un bâtiment

Nous commençons par modéliser une maison typique, avec des murs, des plafonds et des fenêtres, tous représentés avec leur épaisseur. Nous modélisons sur ArchiCAD, un logiciel BIM. Il nous permet d'importer et/ou d'exporter des modèles dans un code de calcul pour réaliser des simulations physiques. [WEISE, et al., 2009].

Le processus de construction du modèle commence par l'acquisition de l'information nécessaire (à partir des cartes cadastrales, LIDAR, orthophotographies et mesures sur site) puis le nettoyage et le post-traitement de celle-ci.

Une fois l'information disponible, il faut d'abord générer une grille en 2D au sol (cf. figure 5-2D), en suivant les étapes suivantes :

- Dessiner le polygone correspondant à l'emprise du bâtiment (figure 5-2D-a) ;
- Projeter dessus la structure porteuse du rez-de-chaussée du bâtiment(figure 5-2D-b) ;
- « Projeter » de la même manière chacune des façades afin de générer une grille sur le polygone d'origine(figure 5-2D-c et d) ; Le polygone au sol et la grille projetée, en 2D (figure 5-2D-e) , vont permettre la mise en place du bâtiment en 3D, en suivant les étapes suivantes :
- Créer les premiers polyèdres qui construiront le modèle 3D en procédant à l'extrusion des éléments qui correspondent aux murs de périmètre du bâtiment(figure 3-3D-a) ;
- Construire de même le modèle de bas en haut, en empilant les "briques" en maintenant la conformité (figure 5-3D-b à d) ;
- Créer les polygones qui composent le toit à partir de la même projection que les polygones du sol (figure 5-3D-e).

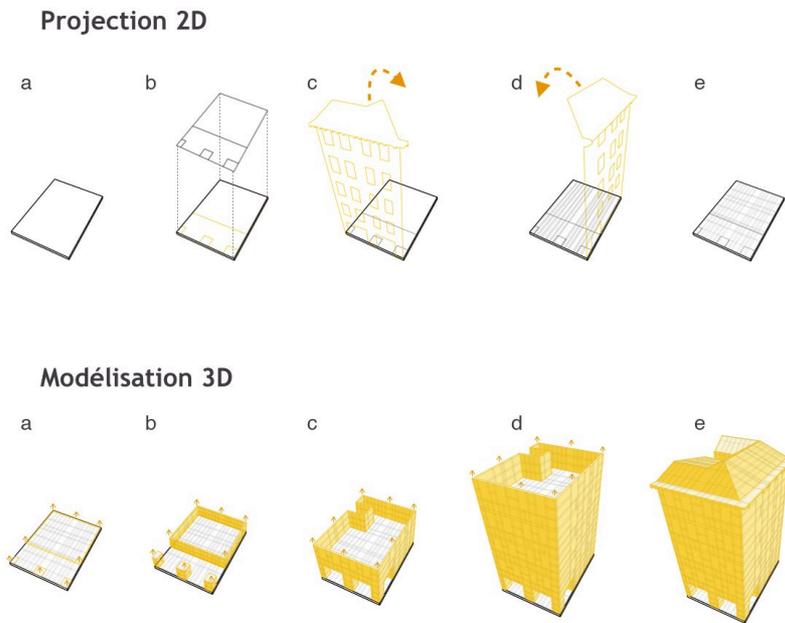


Figure 5. Processus de génération du modèle 3D d'un bâtiment

Le résultat est un modèle géométrique-sémantique cohérent, construit à partir d'hexaèdres, qui reproduit de façon schématique, mais réelle, la structure (poutres et poteaux), ses joints et tous les éléments qui composent les murs, qu'il s'agisse de maçonnerie, de fenêtres ou d'autres éléments.

Pour le 13 rue des Tonneliers (bâtiment qui fait l'angle avec la rue Pontrique et a donc 2 façades vues comme schématisé sur la figure 6), le modèle est composé de 5 729 éléments. Un opérateur expérimenté réalise ce maillage en 1h30 environ. Chaque élément peut avoir ses propres propriétés et caractéristiques. La richesse sémantique du modèle nous permet d'identifier la fonction et la localisation de chaque élément. [GARCIA-NEVADO et al., 2017]

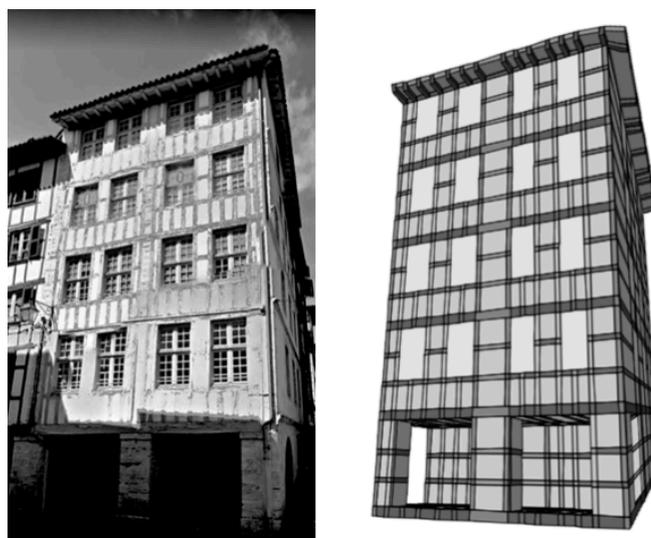


Figure 6. Le 13 rue des Tonneliers et son modèle comportant 5729 éléments.

## 2.2. À l'échelle de la rue

Dans une scène urbaine, l'implantation d'un bâtiment est toujours plus ou moins liée à d'autres implantations, de sorte que la juxtaposition des modèles de chaque bâtiment n'est pas automatiquement correcte quant à la conformité du maillage. Il est donc nécessaire de créer des éléments (polyèdres) de connexion entre un bâtiment et un autre pour maintenir la conformité (figure 7).

Il est donc important de prêter attention aux hauteurs relatives entre les bâtiments qui composent la scène et à leurs relations géométriques. À mesure que le modèle s'agrandit, la complexité de certaines relations augmente.



Figure 7. La rue des Tonneliers et son modèle géométrique conforme. (Image prise du livre *Bayonne, Ville d'art et d'histoire*. Editions koegui)

## 7. Discussion

La Rue des Tonneliers du Petit Bayonne, objet du modèle ici présenté, forme un ensemble typique de bâtiments remontant, pour les plus anciens, au XVII<sup>ème</sup> siècle. Leurs façades à pans de bois ont suggéré un maillage cohérent qui est naturellement conforme, à quelques corrections mineures près. Par conséquent, il est possible d'obtenir une représentation précise de la réalité sans simplifications excessives, avec un nombre raisonnable d'éléments (Tableau1).

Rue des Tonneliers		
Éléments de volume	Éléments de surface	Nombre de Bâtiments
# hexaèdres	# quadrilatères	
~ 150 000	~ 30 000	~25

Tableau 1. Caractéristiques du model de la rue des Tonneliers

La façon dont le modèle est construit permet plusieurs analyses physiques.

Il permet l'analyse de l'éclairage, naturel et artificiel. Le modèle différencie les parties en bois et en plâtre des façades, ce qui permet de leur attribuer un coefficient de réflexion approprié : selon nos mesures,  $\rho \approx 0.35$  pour le bois et  $\rho \approx 0.69$  pour le plâtre.

Le modèle permet également de réaliser une analyse acoustique urbaine. La simulation à hautes fréquences étant basée sur le lancer de rayons ou des techniques analogues, comme pour la lumière, il suffit de substituer les coefficients de réflexion lumineux par des coefficients acoustiques.

Il est également possible d'effectuer une analyse thermique, où les trois mécanismes de transfert de chaleur sont pris en compte [BECKERS et al., 2017].

La conduction affecte les éléments de volume. Pour la calculer, il est nécessaire de donner des valeurs de conductivité et de capacité thermique à ces éléments. La conformité requise par un modèle FEM facilite le calcul de la conduction thermique entre les éléments du modèle.

La convection est incluse dans le modèle au moyen d'un coefficient  $h$  (extérieur et intérieur) et agit sur les surfaces du modèle. (Figure8)

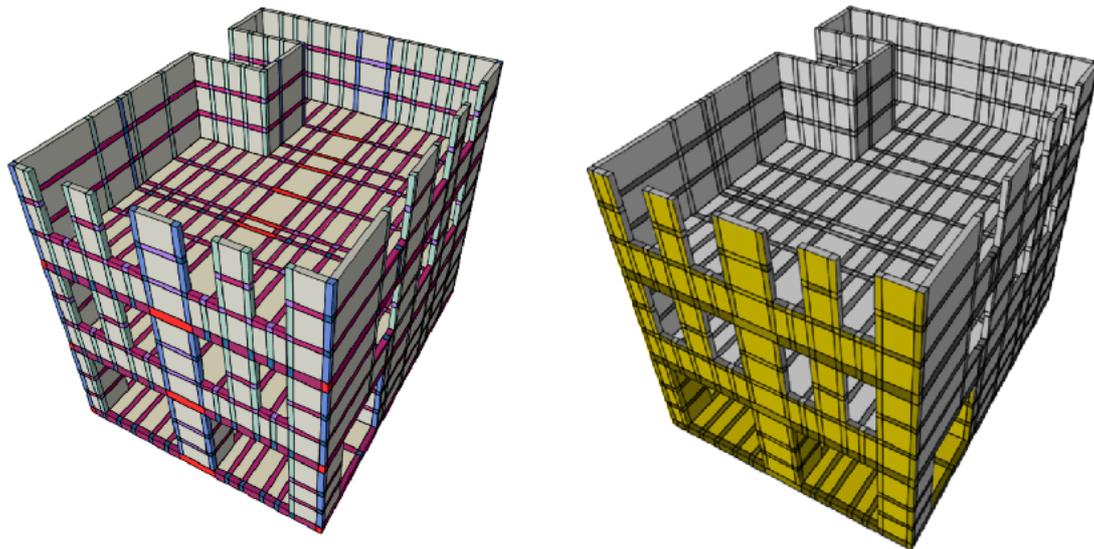


Figure 8. Éléments de volume affectés (conduction) Éléments de surface affectés (rayonnement)

Le rayonnement en ondes courtes ( $<4\mu$ ) est pris en compte par un coefficient de réflexion similaire à celui utilisé pour la lumière visible, alors que le rayonnement en ondes longues ( $>4\mu$ ) nécessite de spécifier l'émissivité des surfaces.

Une analyse de l'aérodynamique (CFD) est également envisageable puisque nous partageons la même philosophie du maillage par hexaèdres [BLOCKEN, 2015].

Le modèle a été construit dans ArchiCAD, un logiciel BIM. Il y a deux avantages principaux du BIM par rapport aux autres logiciels de modélisation 3D ou de CAO.

Il permet la construction directe d'un maillage conforme par des éléments hexaèdres qui représentent des éléments réels de la construction (Le modèle CAO s'identifie au maillage), ainsi que la possibilité d'inclure des informations supplémentaires en plus de la géométrie et d'établir des relations entre les éléments qui composent le modèle.

Ce travail a été réalisé en vue d'une simulation thermique par éléments finis (sa conformité et ses caractéristiques sémantiques permettent un bon format d'échange entre BIM et FEM), mais, comme on vient de le voir, il est bien adapté pour d'autres analyses physiques.

## 8. Conclusions

Un nouveau modèle de bâtiment 3D destiné à la simulation thermique par FEM a été présenté. La possibilité de générer un modèle 3D dont les éléments sont directement enrichis de leurs différentes caractéristiques (matériaux, dimensions, ...) a été discutée. Il a la capacité de reproduire une réalité spatiale-sémantique, [STADLER, et al., 2007] de sorte qu'une logique constructive est représentée, bien que simplifiée. Par conséquent, cela en fait un bon choix en tant qu'une référence « ground truth » pour un modèle 3D de ville.

Pour le faire, certaines lignes directrices ont été établies pour guider la construction du modèle. Le modèle devrait être construit par un maillage conforme. Nous avons donc décidé de le construire en utilisant un maillage d'hexaèdres conformes. Cette approche nécessite certaines abstractions qui ont été faites manuellement. Ce modèle montre une certaine complexité, conservant une richesse géométrique et sémantique. Donc, il pourrait être considéré comme spatio-sémantiquement cohérent.

Nous ne prétendons pas pouvoir représenter une scène urbaine de manière exacte, mais nous cherchons à reconstruire une approche qui nous permette de travailler avec la scène urbaine.

## 9. Remerciements

Nous voudrions remercier la ville de Bayonne qui nous a fourni l'information cadastrale pour le référencement du modèle et a autorisé la campagne de mesure. Nous remercions Christophe Bagieu, professeur au lycée Cantau, tous ses élèves en classe de BTS Topographie et tous ses collaborateurs qui ont acquis, assemblé et traité l'information pour construire les nuages de points. Nous tenons aussi à remercier Jean-Nicolas Deurveilher de LEICA pour toutes les données acquises et partagées. Cette campagne de mesure nous a permis d'avoir toutes les informations nécessaires à la construction d'un modèle répondant aux besoins de notre recherche. Un remerciement particulier à Elena García-Nevado qui, en plus de la construction d'un premier cas test de la Rue des Tonneliers (Bayonne), a produit la série de thermographies utilisée dans ce document.

## 10. Bibliographie

- [ALIAGA, 2013] Chapter 9, Geometrical Models of the City, *Solar Energy at Urban Scale*, ISTE Ltd. 191–203, 2013.
- [BARAZZETTI et al., 2015] BARAZZETTI, L. et al. Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. *Simulation Modelling Practice and Theory* 57, 71–87, 2015
- [BAZJANAC et al., 2011] BAZJANAC, V., MAILE, T., ROSE, C. et JAMES, T. O. D. An assessment of the use of building energy performance simulation in early design. *Proceedings of the 12th Conference of International Building Performance Simulation Association* 14–16, 2011.
- [BECKERS et al., 2017] BECKERS, B., AGUERRE, J. P., BESUIEVKSY, G., FERNÁNDEZ, E., GARCIA-NEVADO, E., LA BORDERIE, C., NAHON, R., Visualizing the infrared response of an urban canyon throughout a sunny day. in *World Renewable Energy Congress and Network Forum 4*, 2017.
- [BENNER et al., 2005] BENNER, J., GEIGER, A. et LEINEMANN, K. Flexible Generation of Semantic 3D Building Models. *Workshop on Next Generation 3D City Models* 49, 17–22, 2005.
- [BESUIEVKSY et al., 2016] BESUIEVKSY, G., BECKERS, B. et PATOW, G. Skyline-control Based LoD Generation for Solar Analysis in 3D Cities. in *International Conference on Urban Physics* 32–44, 2016.
- [BILJECKI et al., 2017] BILJECKI, F., HEUVELINK, G. B. M., LEDOUX, H. et STOTER, J. The effect of acquisition error and level of detail on the accuracy of spatial analyses. *Cartography and Geographic Information Science* 45, 1–21, 2017.
- [BLOCKEN, 2015] BLOCKEN, B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment* 91, 219–245 (2015).
- [CIGNONI et al., 1998] CIGNONI, P., MONTANI, C. et SCOPIGNO, R. A comparison of mesh simplification algorithms. *Computers and Graphics (Pergamon)* 22, 37–54, 1998.
- [CLARK et al., 1976] CLARK, J. H. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms. *Communications of the ACM* 19, 547–554, 1976.
- [CRESPI et al., 2015] CRESPI, P., FRANCHI, A., RONCA, P., GIORDANO, N., SCAMARDO, M., GUSMEROLI, G., SCHIANTARELLI, G., et al. From BIM to FEM: the analysis of an historical masonry building. *WIT Transaction on The Built Environment* 149, 581–592, 2015.
- [DUPLANTIER, 2012] DUPLANTIER, D., *Bayonne, Ville d'art et d'histoire*. (Editions koegui, 2012)
- [GARCIA-NEVADO et al., 2017] GARCIA-NEVADO, E., BECKERS, B. et COCH, H. Characterization of façade fenestration for energy studies within the 'eixample' urban tissue of Barcelona. *Energy Procedia* 122, 397–402, 2017.

- [GRÖGER et al., 2012] GRÖGER, G. et PLÜMER, L. CityGML - Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 71, 12–33 , 2012.
- [HITCHCOCK et al., 2011] HITCHCOCK, R. J. et WONG, J. Transforming IFC Architectural View BIMS for Energy Simulation: 2011. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association* 1089–1095 , 2011.
- [KOLBE, 2009] KOLBE, T. H. Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML. *3D Geo-Information Sciences* 15–31, 2009.
- [LUEBKE, et al., 2003] LUEBKE, D., REDDY, M., COHEN, J. D., VARSHNEY, A., WATSON, B., HUEBNER, R., *Level of Detail for 3D graphics*. (Morgan Kaufmann Publishers, 2003).
- [MAILE, et al., 2013] MAILE, T., O'DONNELL, J., BAZJANAC, V. et ROSE, C. BIM - Geometry modelling guidelines for building energy performance simulation. in *13th Conference of the International Building Performance Simulation Association* 3242–3249 , 2013.
- [PRÉVOT, et al., 2011] PRÉVOT, A., RODRIGUEZ, D., MOLINES, N. et BECKERS, B. La modélisation 3D : une nouvelle voie pour les documents d'urbanisme ? Application à l'optimisation énergétique des bâtiments. *Revue internationale de géomatique* 21, 557–583 , 2011.
- [RASSINEUX, et al., 2016] RASSINEUX, A. et BECKERS, B. A robust smoothed voxel representation for the generation of finite element models for computational urban physics. in *International Conference on Urban Physics* 249–259 , 2016.
- [SENAVE, et al., 2015] SENAVE, M. et BOEYKENS, S. Link between BIM and energy simulation. *Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations* 149, 341–352 (2015).
- [STADLER, et al., 2007] STADLER, A. et KOLBE, T. H. Spatio-semantic coherence in the integration of 3D city models. *Proceedings of the 5th International ISPRS Symposium on Spatial Data Quality ISSDQ 2007* in Enschede, The Netherlands, 13-15 June 2007 13–15 , 2007.
- [SUTHERLAND, 1968] SUTHERLAND, I. E. Sketchpad: A man-machine graphical communication system. *AFIPS Conference Proceedings* 23, 323–328 , 1968.
- [THAKUR, et al., 2009] THAKUR, A., BANERJEE, A. G. et GUPTA, S. K. A survey of CAD model simplification techniques for physics-based simulation applications. *CAD Computer Aided Design* 41, 65–80 , 2009.
- [WEISE, et al., 2009] WEISE, M., LIEBICH, T., SEE, R., BAZJANAC, V. et LAINE, T. Space Boundaries for thermal analysis. 68 , 2009.
- [WHITE, et al., 2003] WHITE, D. R., SAIGAL, S. et OWEN, S. J. Meshing complexity of single part CAD models. *Proceedings of the 12th International Meshing Roundtable* 121–134 , 2003.
- [ZHU, et al., 2018] ZHU, Q., HU, M., ZHANG, Y. et DU, Z. Research and Practice in Three-Dimensional City Modeling. *Geo-spatial Information Science* 5020, 2018.