

Création, administration et utilisation d'un modèle urbain numérique en 3D

■ Gerald FORKERT

■ MOTS-CLÉS

Modèle 3D urbain, niveau de Détail, aménagement urbain, visualisation 3D, intégration SIG

La mise en place de projet pour la modélisation

tridimensionnelle urbaine est devenue une réalité depuis quelques années notamment en Allemagne et en Autriche. Certaines sociétés travaillant

dans ce domaine spécifique se sont même créées pour fournir des services d'assistance et développer des logiciels spécifiques.

Les outils adéquats devront répondre aux principes suivants :

- Dans son utilisation primaire, le modèle 3D urbain va servir de support lors de missions de planification urbaine et notamment à accroître la qualité des rendus des résultats de la planification.
- Un système logiciel spécifique doit pouvoir être utilisé par les services municipaux pour aider à la création du modèle en 3D. Des fonctionnalités de mise à jour, de gestion et de manipulation doivent également être disponibles.
- Pour jouer un rôle lors des processus de planification urbaine, le modèle 3D doit être compatible avec le Système d'Information Géographique (SIG) existant. Le système doit donc pouvoir être intégré dans le système de gestion des données topographiques existantes sous forme d'une extension tridimensionnelle.
- Les données topographiques existantes étant essentiellement linéaires, le modèle urbain doit reposer sur des mêmes lignes structurelles 3D. A partir de là, des modèles de surfaces pourront en être dérivés grâce à des algorithmes de triangulation intelligents.
- L'administration de la base de données du modèle 3D doit être assistée, notamment pour en assurer la mise à jour.
- L'utilisation du modèle 3D doit se faire, le plus largement possible, dans le cadre des processus de travail existants.

CityGRID est, par exemple, un système logiciel appartenant à cette catégorie. Cet article présente les concepts, les outils et certains exemples de réalisation de modèles 3D notamment dans les grandes villes autrichiennes.

Création du modèle urbain en 3D

La modélisation des bâtiments est réalisée à partir de ses lignes de structures. La représentation sous forme de surfaces est automatiquement dérivée de la structure linéaire. Si la structure linéaire de base n'est pas assez détaillée pour permettre d'en dériver un modèle de surfaces suffisamment représentatif, la structure linéaire peut être complétée et améliorée au cours du processus de modélisation. Dans le cas d'éléments linéaires, restitués à partir d'une photogrammétrie à grande échelle ou d'un levé géodésique garantissant une bonne précision, il sera intéressant de pouvoir stocker la position planimétrique et l'altitude de ces lignes. La modélisation consiste alors, d'une part, en des améliorations topologiques, et, d'autre part, à compléter la structure linéaire en intégrant de nouvelles lignes qui ne sont pas directement mesurables.

■ Structure des lignes d'objet

La modélisation repose essentiellement sur les types de lignes d'objet suivants dont une illustration est présentée dans la figure 1 :

- Ligne d'avant-toit (ligne de bordure)
- Ligne d'avant-toit détaillée (ou ligne de bordure détaillée)
- Ligne de faîte
- Ligne de toiture en général
- Ligne de rupture supérieure
- Ligne de rupture inférieure
- Ligne d'avant-toit interne
- Bord supérieur de la façade
- Bord inférieur de la façade
- Ligne de découpe de la façade

■ Unités/Identifiants

Tous les objets appartenant à un même bâtiment d'un point de vue administratif (par exemple, parce qu'ils représentent une même unité foncière ou parce qu'ils ont une même adresse ou sont enregistrés comme même entité dans le SIG) sont affectés à un même "numéro identifiant". Cette notion d'identifiant est, en règle générale, transcrite à partir du SIG déjà existant, et constitue l'ensemble des clés pour l'interconnexion du modèle urbain avec les informations relatives aux bâtiments qui y sont gérées.



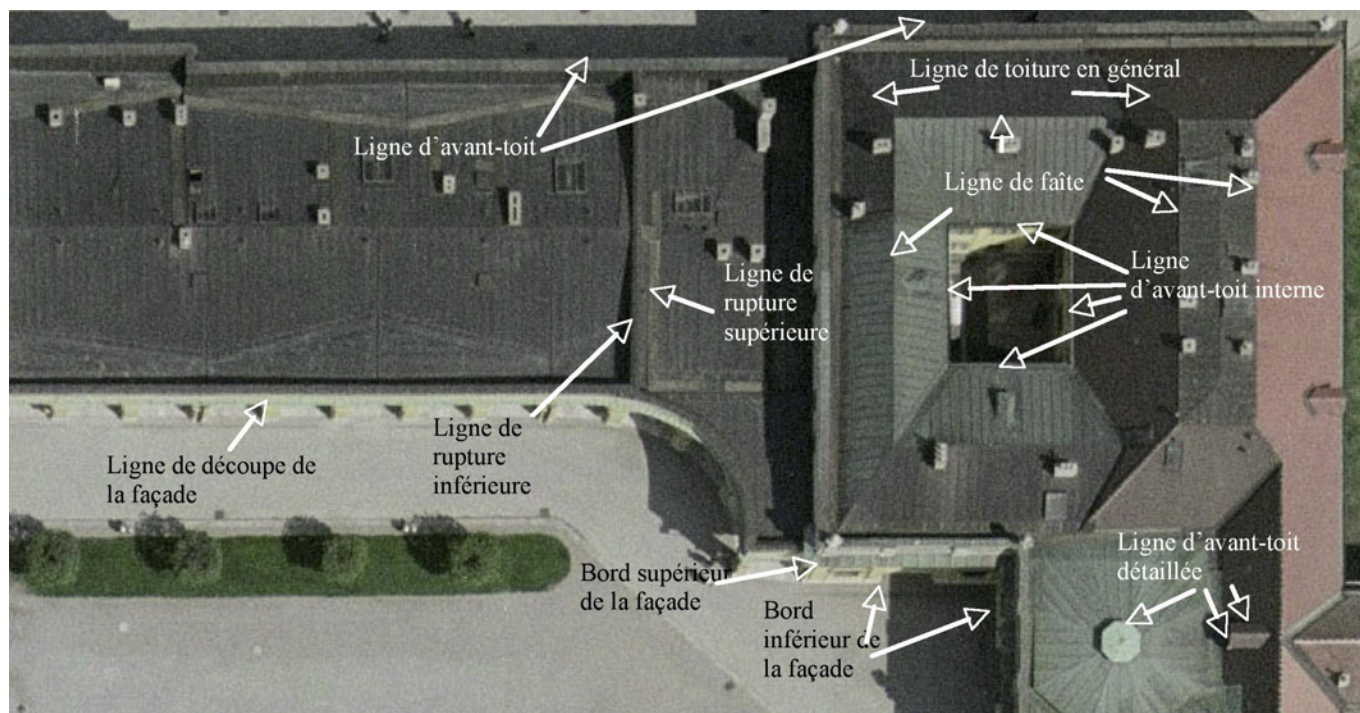


Figure 1. Les différents types de lignes de structure utilisés lors de la modélisation.



■ Structure des objets

Un bâtiment complexe ou un groupe de bâtiments devra être divisé en plusieurs "objets". Nous pouvons considérer comme "objet" toute construction autonome architecturalement parlant. Il faut ainsi définir une ligne d'avant-toit fermée, unique et propre à chaque "objet".

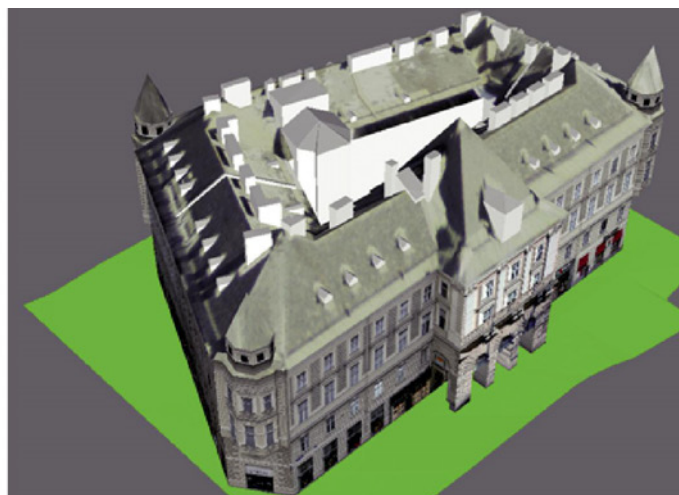
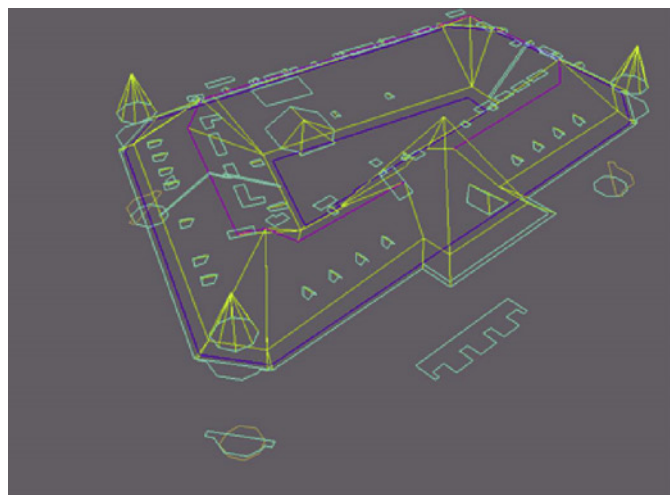
■ Éléments de détail

Pour une modélisation plus fine, les éléments débordant du toit, tels que lucarnes, cheminées, etc. doivent être structurés comme étant des "éléments de détail" d'un objet. Un "élément de détail" sera automatiquement extrudé sur le toit de l'"objet-père". Nous nous épargnons ainsi l'analyse explicite de lignes de rupture inférieures. Par ailleurs, la triangulation de l'"objet-père" en restera simple.

■ Modélisation

Après l'analyse, la modélisation est effectuée en plusieurs étapes avec le modèleur spécifique de l'outil. Dans les illustrations suivantes, nous retrouvons les lignes structurales stockées dans la base de données (figure 2a) et les modèles de surface dérivés (figure 2b) :

- Importation des lignes de toiture depuis l'analyse et triangulation automatique du modèle de surface.
- Correction semi-automatique d'erreurs éventuelles, modélisation du toit principal.
- Intégration des détails du toit.
- Modélisation des saillies de toit et des surélévations, des passages, des arcades, etc. Celle-ci peut être réalisée à l'aide de photographies de façades ou, pour une plus grande précision, à l'aide des levés terrestres existants.



Figures 2 : (a) modèle filaire des lignes de structure, (b) modèle de surface dérivé.

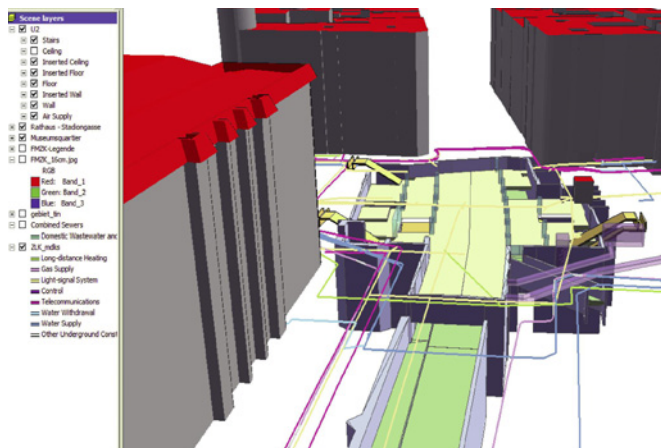


Figure 3 : Modèle tridimensionnel d'une station de métro généré avec le système CityGRID Modeler intégré dans le modèle urbain. Représentation du modèle sous ArcGIS.

- Intégration d'éléments de façades tels que des balcons.
- Texturation du toit et des façades.

■ *Modèle numérique de terrain*

En ce qui concerne le modèle numérique de terrain, la prise en compte des niveaux de détail suivants se sont avérés judicieux :

- Pour les modèles urbains qui ne seront observés que de très haut, donc seulement en survol virtuel, la création d'un simple modèle de terrain à partir de points géodésiques existants est suffisante. Le réseau de triangulation (TIN) interpolé devrait idéalement avoir un maillage de 25 m à 50 m. Un bon exemple de ce niveau de détail est le modèle de terrain de Google Earth.
- Pour les modèles urbains qui seront observés depuis une faible altitude, donc en vol rasant virtuel, la prise en compte supplémentaire des bords et ruptures du terrain près des talus, des murs de soutènement, des berges de rivières etc. est indispensable.
- Pour les modèles urbains qui seront observés depuis le sol, donc par un promeneur virtuel, toutes les dénivellations de terrain de plus de 0,3 m devraient être prises en compte et ce, sous forme de lignes de rupture supérieures et inférieures. De plus, il serait avantageux de prendre également en compte des limites inférieures de bâtiments ayant éventuellement déjà fait l'objet d'un levé. En option, on pourra aussi intégrer dans le modèle numérique de terrain les limites inférieures déterminées au cours de l'extrusion des façades.

■ *Ponts, installations souterraines*

Ponts et installations souterraines peuvent aussi être représentés selon le principe de la modélisation linéaire. Dans ces cas, les lignes structurales définissent les bords des différents éléments de construction. La création de tels modèles massifs tridimensionnels peut se faire très efficacement à l'aide de plans de construction (figure 3).

■ *Données laser 3D*

La photogrammétrie aérienne à grande échelle (cf. § Degrés de détail) est la technique la mieux appropriée pour l'analyse



Figure 4 : Représentation de la végétation sous forme de nuages de points LIDAR.

et la modélisation de bâtiments dans la zone infra-urbaine. La modélisation de bâtiments à partir des données laser aéroporté (aussi appelé "Light Detection And Ranging" ou "LIDAR") ne donne de bons résultats, selon l'état actuel de la technique, que pour des toits de grande surface et de structure simple et n'est donc recommandée que pour les zones appartenant à la périphérie des villes et pour les zones d'habitat en lotissement et jardins.

En revanche, les données de laser 3D, qu'elles proviennent du LIDAR ou de la lasergrammétrie terrestre, peuvent représenter un précieux complément du modèle 3D urbain. Les données laser saisies avec une densité de l'ordre de 4 points par m² ou plus, conviennent en effet parfaitement à la représentation visuelle rationnelle de la végétation. Ainsi, le système gère-t-il efficacement la représentation de très grandes quantités de points pour une visualisation en temps réel (plusieurs centaines de millions de points, en plus du modèle de bâtiments) (figure 4).

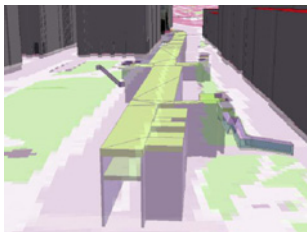
Administration du modèle urbain

Le modèle urbain en 3D est géré à l'aide d'une base de données. Chaque unité de bâtiment est stockée dans la base de données sous un identifiant univoque qui peut être prescrit par l'utilisateur. De cette manière, des modèles urbains avec plusieurs centaines de milliers de bâtiments peuvent être gérés efficacement. L'accès rapide et ciblé à un bâtiment particulier à l'aide de son identifiant ou de son adresse est une condition essentielle au maintien à jour du modèle 3D urbain. La modélisation linéaire est une autre condition préalable à la mise à jour simple, puisque les lignes structurales d'un bâtiment, qui sont stockées, peuvent être facilement projetées dans une image aérienne et être contrôlées.

■ *Degrés de détail*

La modélisation des bâtiments peut se faire avec différents niveaux de détail de représentation. En nous appuyant sur la classification en usage à l'échelle internationale, nous définissons les niveaux de détail ("Level of Detail" ou LoD) suivants :



LoD 1 Modèle bloc 	LoD 2 Modèle de forme de toiture 	LoD 3 Modèle texturisé 	Métro, ponts 
Sources de données : Photogrammétrie LIDAR	Photogrammétrie à grande échelle	Photos de façades et lasergrammétrie terrestre pour des bâtiments complexes	Plans de construction ou données de relevés topographiques
Utilisations : Protection contre les bruits, planification urbaine de grande ampleur	Planification urbaine de faible ampleur, développement de projet	Développement de projet, architecture, protection des monuments et sites classés	Sécurité interne, administration des réseaux d'alimentation



■ Versions successives

Afin de pouvoir suivre à tout moment les modifications effectuées au cours de la modélisation, chaque bâtiment peut être stocké avec un nombre indéfini de versions. De cette manière, il est également possible de représenter et simuler des bâtiments futurs, en phase de projet.

■ Interface avec le Système d'Information Géographique

Pour assurer une utilisation des modèles de bâtiments dans le SIG existant, une interface spécifique a été conçue. Elle permet d'extraire ou d'accéder à des informations de type SIG, à partir du modèle urbain 3D (figure 5).

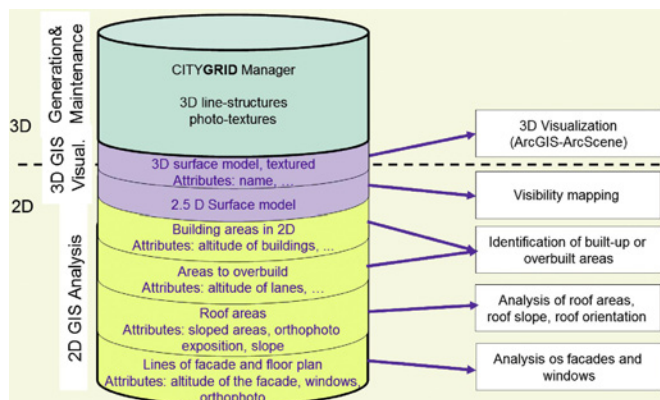


Figure 5 : Interface SIG.

Applications

Une bonne illustration des différents stades de traitements et des différentes possibilités d'applications est donnée par l'exemple du modèle 3D urbain de la ville de Vienne (Autriche). Le modèle de base a les caractéristiques détaillées dans le tableau 1.

Dimensions du modèle : 30.000 bâtiments de LoD 2 avec tous les détails de toitures, 200.000 bâtiments de LoD 1, 35 km d'installations souterraines du métropolitain. Génération du modèle depuis 2003 par le Service Géodésique de la ville de Vienne à l'aide de CityGRID Modeler.

Administration des données : Intégration dans une base Oracle

Mise à jour : La mise à jour se fait en continu, en liaison avec celle des autres données topographiques de la ville. Tous les 3 ans, toutes les données en 2D et 3D d'une feuille cadastrale sont intégralement contrôlées et mises à jour dans le cadre d'une révision.

Charges de personnel : En moyenne, 2 à 3 personnes sont chargées de la création et de la mise à jour du modèle, y compris de l'analyse photogrammétrique.

Utilisation : En l'espace de 3 ans, chaque modèle des bâtiments est en moyenne transmis six fois à un autre département ou à des utilisateurs privés.

Environnement SIG : ESRI

Source : Département de Géomatique et Service Géodésique de la ville de Vienne.

Illustration :

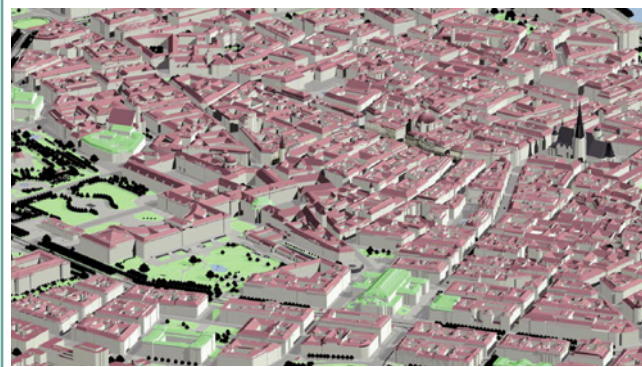


Tableau 1. Caractéristiques du modèle 3D urbain de la ville de Vienne (Autriche).

Utilisation du modèle urbain

La partie suivante reprend quelques utilisations concrètes du modèle 3D urbain dans le cadre de la gestion de la ville de Vienne et de ses environs.

■ Etude de visibilité

Le tableau 2 présente le cas de l'utilisation du modèle 3D urbain dans le cadre d'une étude de visibilité. Lors des phases initiales d'un projet, il convient souvent d'examiner et de définir quelles sont les hauteurs de constructions maximales pouvant être tolérées par rapport à la physionomie urbaine existante. Les modèles 3D sont alors souvent très utiles.

Données disponibles : Modèle urbain en 3D dans l'environnement du projet, à un niveau de détail de représentation LoD 2 ou supérieur.

Préparation liée au projet : Du modèle urbain en 3D est dérivé un modèle de surface matriciel dense qui est ensuite utilisé avec des outils pour la cartographie de visibilité des SIG standards. A cet effet, les nouveaux projets de construction en hauteur sont introduits sous la forme de leur projection horizontale accompagnée de la hauteur de construction. Le terrain est ensuite relevé à hauteur des yeux. La cartographie de visibilité automatique fournit finalement tous les pixels, marqués en couleur, à partir desquels le projet prévu serait visible.

Solution du problème : La hauteur de construction du projet prévu peut être relevée dans le cadre d'une simulation pas à pas, tant qu'aucune dégradation des zones sensibles de la ville n'est décelée. Ces zones sensibles sont, par exemple, les axes de perspective – significatifs du point de vue urbanistique – le long des rues importantes et les sites qui ont de tout temps déjà permis d'offrir une vue attrayante sur la ville ou sur des édifices importants.

Source : Service de l'Urbanisme de la ville de Vienne.

Illustration : Etude de visibilité pour le projet de tour "Kometgründe" à Vienne.

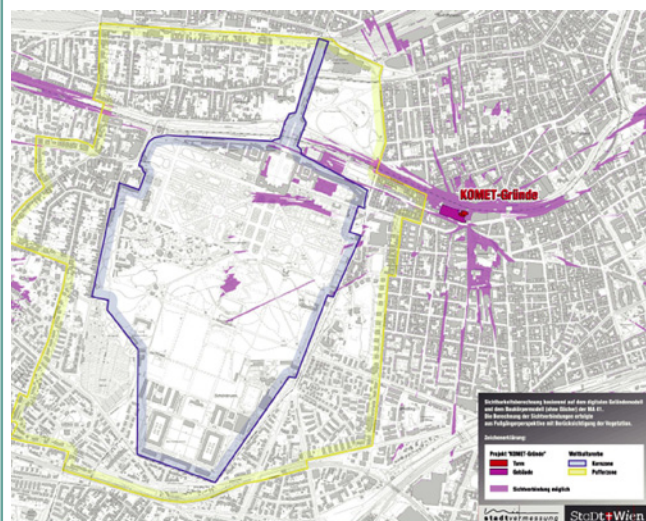


Tableau 2. Etude de visibilité.

■ Modèle d'environnement pour l'élaboration d'un "masterplan"

Dans le cas où la construction de nouveaux édifices est planifiée à l'échelle d'un quartier entier, il faut, et ce dès le début du processus de planification, prédéfinir la structure des voies de circulation et les volumes disponibles pour la construction des édifices. Ce "masterplan" doit toutefois être soigneusement adapté à l'environnement existant. Le tableau 3 montre les caractéristiques d'une telle analyse.

Données disponibles : Modèle 3D urbain dans l'environnement du projet, à un niveau de détail de représentation LoD 1 ou supérieur.

Préparation liée au projet : Tout autour du nouveau quartier, la zone de projet, qui comprend aussi les bâtiments existants avoisinants, est redéfinie. Les modèles des bâtiments de cette zone de projet sont alors prélevés du modèle 3D urbain et ils sont stockés localement. Le cas échéant, des bâtiments subsistant sur la partie à construire devront être "démolis" par voie numérique. Dans un environnement logiciel de type DAO, les volumes maximums constructibles, conformément à la nouvelle affectation du sol, peuvent maintenant être construits sous forme de ce qu'on appelle des "corps de bâtiment d'affectation".

Solution du problème : En général, le masterplan est créé dans le cadre d'un long processus de discussion, au cours duquel plusieurs variantes d'affectation sont mises au point, visualisées en trois dimensions et évaluées en liaison avec les quartiers environnants.

Il est fréquent que les investisseurs déterminants soient aussi déjà intégrés dans ce processus de discussion afin de parvenir à un compromis optimal entre leurs intérêts économiques et la protection de la physionomie de la ville.

Source : Service de l'Urbanisme de la ville de Vienne.

Exemple : Masterplan de la gare centrale de Vienne



Tableau 3. Elaboration d'un "masterplan" pour le développement urbain.

► ■ Base de décision pour le développement du projet

Au cours du développement du projet, des investisseurs privés entrent en négociation avec le service de l'urbanisme de la ville pour obtenir des conditions de construction qui soient les plus avantageuses possibles (donc les plus permissives possibles) pour une parcelle de constructibilité bien définie. Dans le cas de gros projets d'investissement, susceptibles d'avoir aussi des incidences économiques positives sur la ville, le service de l'urbanisme est confronté au problème consistant à trouver un compromis avec la structure urbanistique environnante, ce compromis devant être le plus optimal possible (tableau 4).

Données disponibles : Modèle 3D urbain dans l'environnement du projet, à un niveau de détail de représentation LoD 2 ou supérieur ; le cas échéant, données LIDAR pour la représentation de la végétation et du plan d'avant-projet sommaire.

Préparation liée au projet : Les modèles 3D des bâtiments de la zone de projet ainsi que l'extrait de plan correspondant sont stockés localement à partir des données LIDAR. Dans un environnement logiciel de type DAO, le corps des bâtiments projetés est alors bâti étage par étage sous forme de "modèles en couches", à l'aide des plans d'avant-projet. A l'aide d'un modèle de surface matriciel dérivé du modèle urbain en 3D, il est possible d'obtenir, par filtrage des données LIDAR, les nuages de points qui représentent la végétation. A partir du modèle numérique de terrain, des bâtiments environnants, du modèle de projet et des nuages de points extraits par filtrage, il est finalement possible de créer une simulation 3D interactive et "navigable".

Solution du problème : Le projet envisagé par l'investisseur peut être représenté avec les bâtiments existants et avec la végétation, et peut être observé sous tous les angles de manière interactive. De cette façon, les incidences possibles du projet peuvent être évaluées par des décideurs politiques, ce qui n'est généralement pas possible au moyen des seuls plans de projet. L'investisseur peut déjà entrer en négociation avec les décideurs politiques à un stade précoce du développement du projet, avant que des coûts élevés ne soient occasionnés pour la planification.

Source : Service de l'urbanisme de la ville de Klosterneuburg.

Exemple : Hospice de Weidling, comparaison situation actuelle / future.

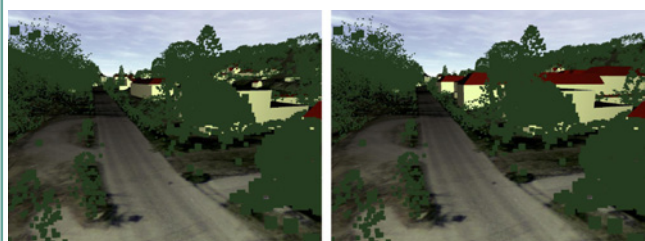


Tableau 4. Simulation dans le cadre des négociations de projet.

■ Modèle de base en 3D pour les concours d'architectes

Dès que les prescriptions de constructions (qui sont souvent le résultat des processus décrits dans les étapes précédentes) ainsi que la planification du projet de construction sont définies, il s'agit très souvent de trouver la variante la plus optimale dans le cadre d'un concours d'architectes. Pour cela, il faut mettre des informations sur l'environnement architectural existant à la disposition des architectes participant à ce concours. Le tableau 5 décrit ce processus.

Données disponibles : Modèle 3D urbain des bâtiments existants ("modèle de l'existant", ou "modèle d'environnement", éventuellement déjà créé dans le cadre des étapes précédentes) à un niveau de détail LoD 2 ou LoD 3.

Préparation liée au projet : Le modèle 3D de l'existant est converti en différents formats DAO (AutoCAD, Microstation, 3d Studio ou systèmes logiciels équivalents) et mis à la disposition des architectes participant au concours. En option, l'adjudicateur peut, pour l'évaluation des résultats du concours, faire représenter les projets soumis sous forme de modèles d'architecture 3D et intégrer ceux-ci dans une simulation 3D du projet (comme décrit précédemment).

Solution du problème : Grâce au modèle de l'existant mis à disposition, les architectes participant au concours peuvent mieux tenir compte de la structure architecturale à conserver, ce qui a généralement pour effet d'augmenter la qualité des résultats fournis. L'adjudicateur a en outre la possibilité d'évaluer les projets soumis dans un cadre homogène.

Source : Land Niederösterreich.

Exemple : Gugging (près de Vienne en Autriche).



Tableau 5. Fourniture de modèle 3D.

■ Simulation 3D pour l'information des citoyens

Dans le cas de gros projets en zone urbaine (tableau 6), les citoyens ont souvent de vives objections. Les riverains, qui ont qualité de parties dans le cadre de la procédure administrative en vue de l'autorisation de l'ouvrage, peuvent retarder sensiblement le projet avec leurs protestations. L'expérience montre notamment que lorsque les riverains craignent une dégradation de la perception visuelle habituelle, il faut s'attendre à des résistances de leur part. Dans de tels cas, une simulation facilement compréhensible du projet est donc indispensable.

Données disponibles : Modèle urbain en 3D des bâtiments existants ("modèle de l'existant", ou "modèle d'environnement", éventuellement déjà créé dans le cadre des exemples précédents) ainsi que modèle du projet à un niveau de qualité LoD 2 ou LoD 3.

Préparation liée au projet : Pour la présentation aux riverains, un modèle texturé à un niveau de qualité LoD 3 est impératif. Si le modèle 3D urbain n'est disponible qu'en qualité LoD 2, il faut encore procéder à une texturation des façades et toitures dans la zone du projet.

Le projet lui-même peut également être facilement préparé sous forme de modèle LoD 3 sur la base de la planification détaillée déjà disponible. Si la zone de projet possède une végétation significative, cette dernière peut être saisie très efficacement par lasergrammétrie terrestre. Si besoin, il est possible aussi de créer une simulation de la projection d'ombre produite par le nouveau projet.

Solution du problème : La présentation interactive du projet prévu dans le cadre de l'environnement existant est généralement ressentie de façon très crédible par les citoyens concernés. D'une part, parce que le modèle de l'existant a été généré à partir de données topographiques, d'autre part, parce que le citoyen peut décider lui-même à partir de quel endroit il souhaite observer le projet prévu, et enfin parce qu'il peut déterminer les distances et les différences de niveau de manière simple à l'aide de fonctions de mesures numériques. L'objectif est particulièrement bien atteint si les exploitants du projet essaient d'abord eux-mêmes, à l'aide de la simulation 3D, d'identifier les riverains qui pourraient être visuellement gênés par le projet et de la part desquels il faut s'attendre à des réticences. Il est alors possible de commencer préalablement à négocier des mesures de compensation, ou autres, avec ces riverains. De cette manière, il est possible d'éviter des retards imprévus de la mise en chantier.

Source : Département de Géomatique de la ville de Klagenfurt.

Exemple : Centre commercial ECE à Klagenfurt / Autriche.



Tableau 6. Comparaison des situations actuelles / futures dans le cadre d'un projet d'aménagement.

Conclusion : perspectives d'utilisation du modèle 3D urbain

Le développement urbain et la planification urbaine requièrent actuellement des exigences très élevées en matière de représentation tridimensionnelle, en termes de détails, d'une part, et de disponibilité à grande échelle du modèle 3D urbain, d'autre part. C'est la raison pour laquelle les projets actuels de développement urbain constituent la plupart du temps l'occasion concrète de commencer l'élaboration d'un modèle 3D urbain détaillé.

Le système logiciel *CityGRID* a pour but de rendre ce modèle urbain également exploitable pour d'autres applications, afin de créer les effets de synergie les plus importants possibles pour la planification urbaine, par exemple.

Le modèle 3D urbain pourra alors être également exploité pour les exemples d'applications supplémentaires suivantes :

- Dérivation d'un modèle de base avec un niveau de détail LoD 1 pour la simulation des bruits à grande échelle.
- Détermination de la position des fenêtres à l'aide de la texture des façades pour la simulation des bruits à petite échelle.
- Visualisation de murs antibruit projetés pour l'information des riverains dans les zones sensibles.
- Optimisation de l'aménagement d'espaces verts en zone urbaine par une simulation 3D de variantes de plantation.
- Meilleure planification de nouveaux tracés de canalisations souterraines à proximité du réseau métropolitain.
- Simulation numérique de mesures d'évacuation dans le réseau métropolitain.
- Documentation de l'existant pour la protection des monuments et sites classés.
- Base d'étude de projet pour les aménagements de combles.
- Représentation en 3D de la ville dans Google Earth, dans le cadre du marketing urbain. ●

Contact

Gerald FORKERT

forkert@geodata.at

www.citygrid.at

ABSTRACT

Key words : 3D city models, LoD, urban planning, 3D visualization, GIS integration

CityGrid is a modular system for creating 3-D city models. It is designed to enable creation of photorealistic geo-referenced digital reproductions of cities. Buildings, streets, vegetation and terrain are represented as a model. The concepts for rapid creation of 3-D city models from roof structure lines are discussed. Different Levels of Details (LoD) are proposed. Tools and applications for urban planning with 3D data are described.