

L'apport de la donnée topographique pour la modélisation 3D fine et classifiée d'un territoire

■ Ludovic ANDRES



l'on peut retrouver par exemple sur des sites comme Google Earth. Les bâtiments ainsi modélisés sur la ville sont généralement positionnés sur un modèle numérique de terrain (MNT) souvent de précision métrique, déjà disponible, ou acquis à cet effet.

L'intérêt d'exploiter la donnée topographique pour la modélisation 3D d'un territoire

La démarche présentée ici introduit le concept d'accorder d'emblée une importante place à la donnée topographique pour des modélisations 3D structurées de grands territoires, tant en ce qui concerne leurs constitutions initiales que leurs mises à jour.

Les apports sont alors multiples et très importants en termes d'exactitude de la représentation 3D générée, mais aussi de la structuration des données et du détail des éléments qui viennent alors l'enrichir. De telles modélisations exploitant la donnée topographique sont généralement effectuées sur des superficies limitées : on peut citer à titre d'exemple la très intéressante maquette numérique 3D de la principauté de Monaco qui présente un très grand niveau de détail et de précision. A l'heure où l'éthique a pris une place légitime et indispensable dans le monde de la 3D, cette meilleure représentation du territoire contribue directement au principe de crédibilité tel qu'énoncé dans la charte internationale d'éthique sur la 3D (3dOk, 2011). Par ailleurs, cela permet au modèle 3D d'avoir une représentation de qualité en zone semi-urbaine ou rurale : en effet, dans ces secteurs, la densité de bâtiment devient plus faible et les maquettes ne disposent habituelle-

Les modélisations 3D urbaines ont connu depuis quelques années un développement très important et rapide. Ces outils très intéressants pour la représentation du territoire, les projets d'aménagement, l'architecture, l'aide à la décision, la communication, ou les études sur les problématiques environnementales, ont par ailleurs d'autres multiples applications qui ne sont plus à présenter. L'exploitation de la donnée topographique pour la production de modélisations 3D sur de grands territoires peut permettre d'améliorer la qualité et la structuration de ces modèles pour en développer et faciliter leurs usages.

■ MOTS-CLÉS

3D, villes virtuelles, maquettes numériques, topographie, photogrammétrie, SIG, cityGML

Depuis plusieurs années, de nombreux articles ont détaillé l'état de l'art et les perspectives de cette technologie, aussi bien du point de vue des acquisitions de données, que de son stockage, de son exploitation ou de son intégration naturelle et grandissante au sein des systèmes d'information géographique (SIG) (Laurini et Servigne, 2008, Pornon, 2009, etc.).

Jusqu'à présent les modélisations 3D sur des étendues importantes étaient prioritairement axées sur le traitement en zone urbaine de bâtiments en 3D avec des niveaux de détails (*Level of Detail - LOD*) plus ou moins élevés, et des rendus en texture plus ou moins fins. C'est ce que l'on appelle habituellement "modélisation 3D de ville" et l'on peut citer les modélisations de New York, Berlin, Tokyo, Rome, ou Paris que



ment que du MNT métrique et d'une orthophotographie plaquée. L'apport de la donnée topographique à la modélisation permet dans ces milieux un enrichissement important.

Un tel modèle 3D classifié permet de gérer chaque type d'objets indépendamment et donc d'adapter la maquette à l'usage désiré. On peut ainsi sélectionner les éléments selon l'usage, paramétrer à souhait la symbologie de chaque type d'élément, effectuer des traitements géométriques et des analyses spatiales sur les objets de son choix, importer et exporter sélectivement la donnée depuis et vers différents outils de traitement, d'affichage et de gestion, faciliter la mise à jour en élaborant des processus différents selon les éléments, etc.

Cette représentation 3D virtuelle devenue plus belle, plus juste, plus précise, plus complète, plus structurée, est donc plus utilisable : elle ouvre la porte de manière immédiate sur des applications comme les maquettes immersives qui vont maintenant pouvoir être développées beaucoup plus rapidement puisque l'essentiel des données est déjà disponible et classifiée. Elle améliore et fiabilise très notablement la qualité des applications qui en découlent comme les modélisations hydrauliques de ruissellement de surface, la gestion et la prévention des risques, les calculs et représentations géométriques comme les profils en long ou en travers, les estimations de déblais-remblais pour des projets de plate-forme, bassins, etc.

Au-delà de l'amélioration de la modélisation 3D, l'acquisition des données topographiques qui serait réalisée à l'occasion d'un projet de modélisation 3D, offre l'opportunité d'optimiser la chaîne d'acquisition et de traitement, en mutualisant les ressources, et donc de diminuer les coûts et délais de production de ces deux projets s'ils étaient traités séparément.

On obtient ainsi, *in fine*, outre une modélisation 3D de qualité supérieure, un plan topographique 3D à très grande échelle, homogène, couvrant un vaste territoire, et exploitable instantanément. La cohérence géométrique entre ces données est parfaite et leurs géoréférences peuvent être obtenus directement dans les systèmes légaux de référence en vigueur, le RGF93 et l'IGN69.

Pour une collectivité territoriale comme la Métropole Nice Côte d'Azur, cette acquisition permet d'obtenir très rapidement une meilleure connaissance de son territoire, alors que souvent peu de plans très précis n'existaient dès lors que l'on s'écartait des principales zones urbaines denses. Les enjeux sont multiples dans de nombreux domaines puisque ces données précises facilitent et accélèrent la mise en œuvre de la politique publique décidée par les élus : cela peut par exemple, permettre de réaliser plus rapidement des avant-projets de voirie, des études liées à la planification urbaine, à la circulation, au transport, au diagnostic et à l'aménagement des infrastructures d'accès et de signalisation pour les personnes à

mobilité réduite, à la gestion des réseaux ou à leur extension. Pour ce dernier point on pourra signaler le grand intérêt de telles données dans le cadre de la mise en œuvre de la réforme anti-endommagement des réseaux (Arrêté du 15 février 2012) – ou réforme sur les DT DICT – qui prévoit à terme, de manière réglementaire, l'exigence d'un fond de plan précis.

La méthodologie proposée présente les différentes étapes possibles concernant l'acquisition et le traitement des données pour la constitution d'un modèle initial, en s'attachant particulièrement à la structuration imaginée pour les objets topographiques. Cette structuration permet de générer la modélisation 3D du terrain, de son sursol ainsi que des bâtiments. Une fois ces bases constituées, il est fondamental de se pencher sur les outils et les processus permettant leurs mises à jour.

L'acquisition initiale du plan topographique par photogrammétrie et la génération du modèle 3D classifié

Jusqu'à présent les modélisations de ville en 3D s'attachaient principalement à la restitution de la forme des bâtiments par des techniques de restitution photogrammétriques ciblées sur ces objets, ou bien, par l'acquisition directe des formes de la surface, par exemple au moyen de techniques lidar, lasergrammétriques, ou stéréoscopiques (modèles numériques de surface – MNS – dérivés par corrélation). Le terrain était alors souvent traité séparément, ou bien directement inclus dans l'acquisition du MNS. Dans le premier cas, on notera fréquemment une mauvaise cohérence de positionnement entre le bâtiment créé qui pourra flotter ou s'enfoncer trop profondément dans le sol de précision métrique (*Figure 1*), ou bien une distorsion de la hauteur du bâtiment créée afin de pallier à ce problème.

Dans les autres cas, le MNS créé, représente d'un seul tenant, à la fois la forme du sol et du sursol incluant les bâtiments (*Figure 2*) : ces techniques peuvent offrir d'excellents niveaux de réalisme à la scène 3D produite (Stamos et Allen, 2002) et une grande rapidité de produc-



(source : Google Earth, données Digital Globe, Data SIO, NOAA, US Navy, NGA, GEBCO, TerraMetrics)

Figure 1. Illustration de l'impact d'un MNT de précision insuffisante pour une adaptation parfaite du bâtiment sur le sol : le rez-de-chaussée devient partiellement masqué par le terrain





Figure 2. Modélisation 3D générée à partir d'un MNS texturé créé par une méthode de corrélation multi-vue dense (source : Irschara et al, 2012)



tion. Elles permettent cependant difficilement la génération ultérieure d'une représentation classifiée du modèle 3D ainsi généré, ce qui en limite considérablement les usages.

L'intégration à la base du projet, d'un plan topographique pallie à ces inconvénients. La chaîne d'acquisition et de traitement peut alors se décliner tel qu'illustré en *Figure 3*. Bien entendu

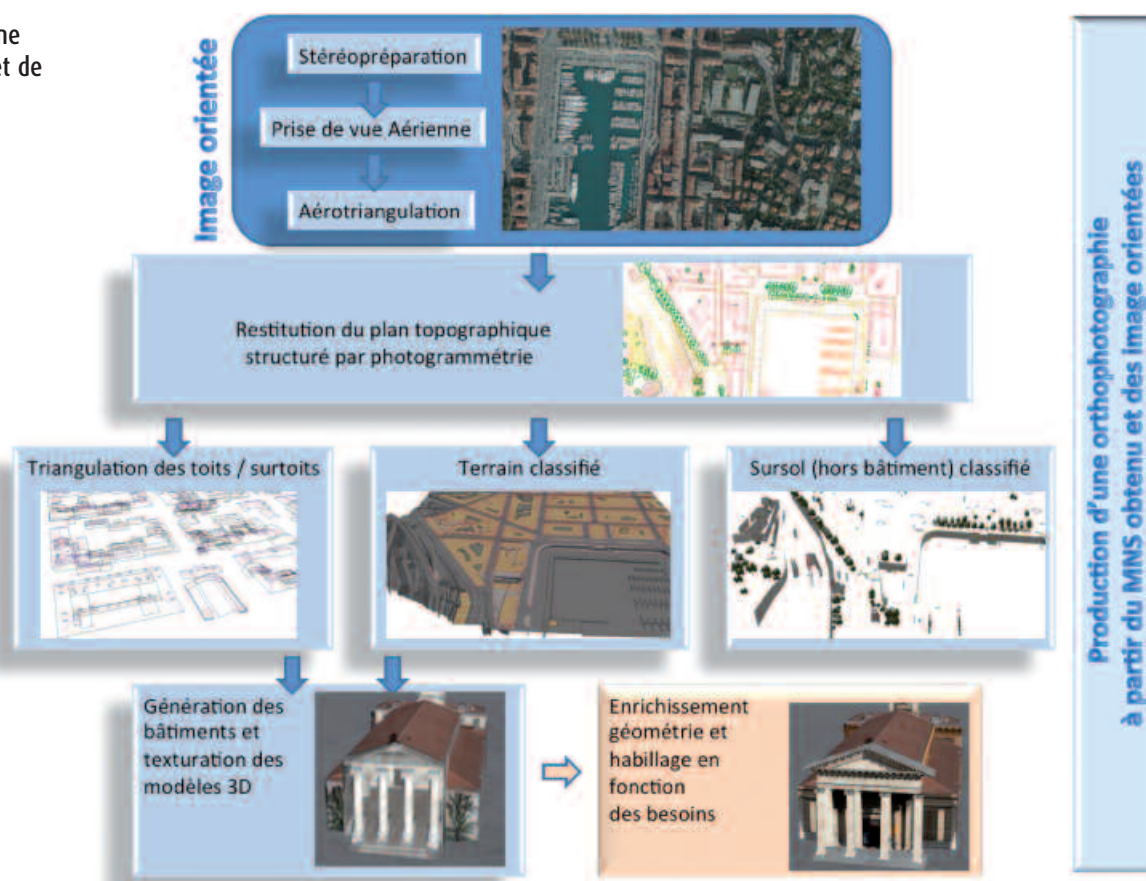
des vérifications à différentes étapes de cette chaîne permettent d'assurer le contrôle qualité et les éventuelles corrections ou reprises nécessaires.

Obtention des images orientées

La première étape, classique, consiste à obtenir des images orientées qui ser-

viront à la restitution photogrammétrique et dont l'aérotriangulation et la résolution doivent être adaptées à la précision finale désirée. Les taux de recouvrement des clichés doivent permettre la restitution, mais être aussi contraints par l'utilisation ultérieure qui sera faite des images pour habiller les façades des bâtiments. En zone urbaine dense, ces taux de recouvrement sont de l'ordre de 80 % longitudinalement et latéralement. Bien entendu à l'issue de la constitution du modèle géométrique, d'autres prises de vues, comme des prises de vues obliques, ou des photographies terrestres haute définition, pourraient être utilisées pour habiller les bâtiments. En ce qui concerne l'expérience pilote de Nice Côte d'Azur, la précision de la restitution photogrammétrique souhaitée est de 15 cm en planimétrie et 25 cm en altimétrie au sens de l'arrêté sur les classes de précisions (Arrêté du 16 septembre 2003). Les caractéristiques de la prise de vue sont donc une résolution de 10 cm, des taux de recouvrement de 80 % - 80 % sur la zone littorale et de 60 % - 40 % sur les zones plus rurales.

Figure 3. Chaîne d'acquisition et de traitement





Afin de faciliter la restitution photogrammétrique, une période hivernale a été privilégiée pour minimiser la couverture végétale et donc la présence de masques. Le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur s'étend de la mer Méditerranée aux hauts sommets du Mercantour. Le relief y étant très prononcé (altitudes variant de 0 m à 3143 m), le plan de vol a dû être particulièrement étudié afin de tenir la contrainte d'un pixel inférieur ou égal à 10 cm. Plus de 7 000 clichés ont été réalisés avec une caméra Microsoft Vexcel Ultracam XP pour couvrir les zones à restituer. Les images orientées permettent une restitution du plan topographique et la génération du modèle 3D directement dans les systèmes légaux de référence en vigueur le RGF93 et l'IGN69, en cohérence avec les autres bases de données géographiques de NCA (Andres, 2002, Andres, 2003). Les erreurs moyennes quadratiques obtenues globalement pour l'aérotriangulation sont de 3,5 cm en X, 3,8 cm en Y et 8,8 cm en Z. La Figure 4 illustre les lignes de vol des prises de vues sur le territoire de la métropole NCA. On y constate la forte densité des clichés sur la partie littorale, ainsi que l'absence de couverture sur les zones montagneuses ne présentant aucun aménagement et qui sont donc inutiles à restituer avec ce niveau de précision.

Restitution photogrammétrique d'un plan topographique structuré

La structuration de la restitution topographique doit permettre la génération ultérieure du modèle 3D avec une classification automatique des divers éléments composant le sol et le sursol. Une structuration et une méthodologie de saisie ont été inventées spécialement à cet effet.

Tout d'abord, tous les objets à restituer ont été précisément identifiés et organisés en différentes familles comme végétation, bâtiments, limites, talus, transport, réseaux, etc. A l'intérieur de chaque famille, les éléments qui la composent donnent lieu à différentes couches et

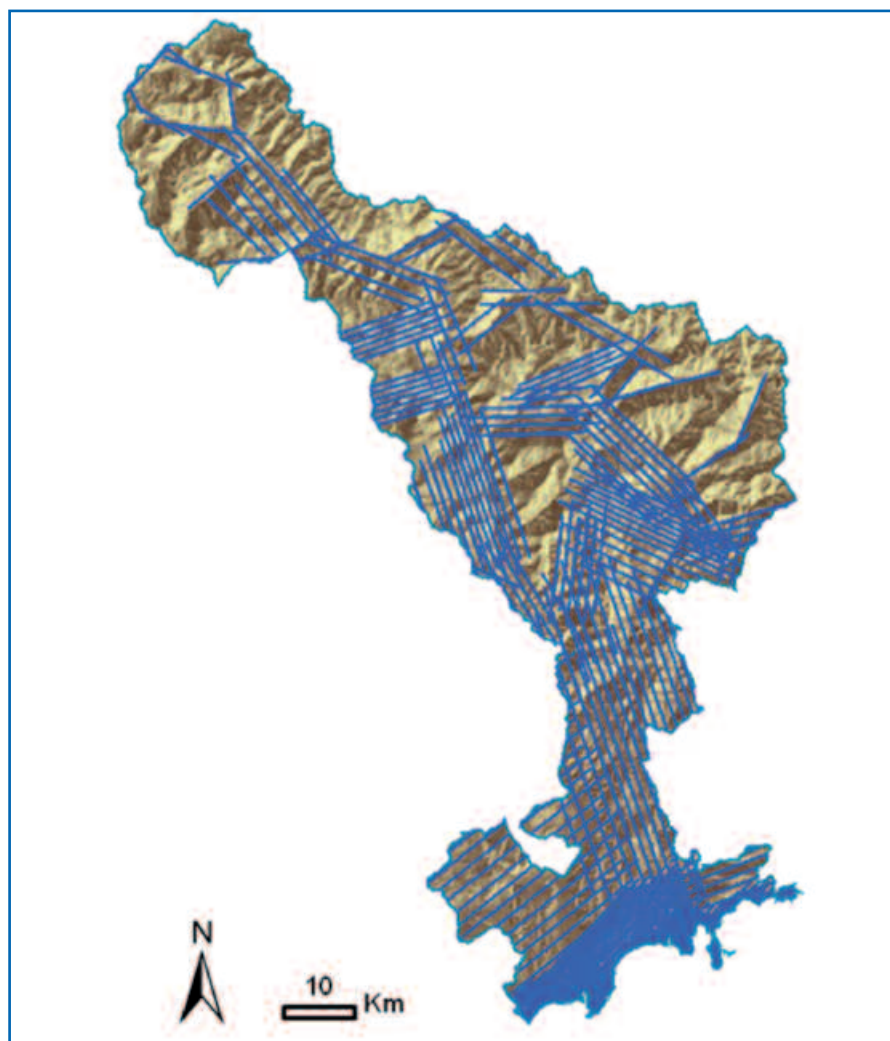


Figure 4. Illustration du plan de vol pour la prise des vues aériennes sur le territoire de la Métropole Nice Côte d'Azur

blocs d'objets selon leur type mais également leur nature surfacique, linéaire ou ponctuelle. Des couches d'habillage sont également prévues pour permettre l'interprétation classique du plan topographique. Chaque élément a été analysé en le confrontant à sa ré-exploitation pour la génération du modèle 3D. Cela a donné lieu à la définition de son mode de saisie, et dans le cas où cela est nécessaire à la modélisation 3D, à l'obligation de saisir des objets complémentaires. Afin d'illustrer ces propos, la Figure 5 présente le simple exemple de la saisie d'un mur. En plus du contour du sommet du mur, les lignes de ruptures de pente doivent être obligatoirement restituées à son pied, car elles permettent de contraindre le terrain qui sera calculé. Le mur faisant partie du sursol pourra alors être modélisé indépendamment, en tant qu'objet 3D classifié faisant

partie du sursol, par son extrusion vers le sol ainsi contraint.

La Figure 6 illustre quant à elle le cas pratique de la restitution d'un escalier menant au niveau de la route depuis le port de Nice (Figure 8).

De nombreux autres cas existent comme par exemple la saisie des murs comportant des fruits ou la saisie des ouvrages d'art. Les fermetures et accrochages des lignes à restituer ont tous été minutieusement étudiés afin de rendre possible la génération automatique de la symbologie des éléments. Cela concerne le terrain, mais également les autres entités. A titre d'exemple, la saisie d'un passage piéton (Figure 7) s'effectue en respectant un sens de digitalisation, une séquence de démarrage orientée perpendiculairement à l'axe de la voie (et donc aux bandes blanches), une distance par rapport au bord de la



chaussée, et une parfaite fermeture de la ligne. Ces prescriptions autoriseront une exploitation 3D avec une symbologie automatique.

Génération du terrain classifié

Une fois tous les objets restitués, des procédures de contrôle sont exécutées

pour vérifier la conformité du plan aussi bien du point de vue de la précision et de l'exhaustivité que de la structuration de la donnée, avec notamment des routines pointues de contrôle de fermeture, de catégorie d'objet par couche, et d'accrochage autorisé.

La validation du plan topographique 3D numérique étant acquise, la génération du terrain s'effectue en sélectionnant

les couches appropriées telles que les lignes de ruptures de pente, les limites béton ou les talus. Le sursol sera lui, constitué des murs, balustrades, escaliers, végétation, etc.

La Figure 8 présente une vue schématique mais très illustrative des différents éléments obtenus qui constituent maintenant le terrain 3D et son sursol. Il s'agit d'une modélisation 3D classifiée et de précision identique à celle du plan topographique restitué.

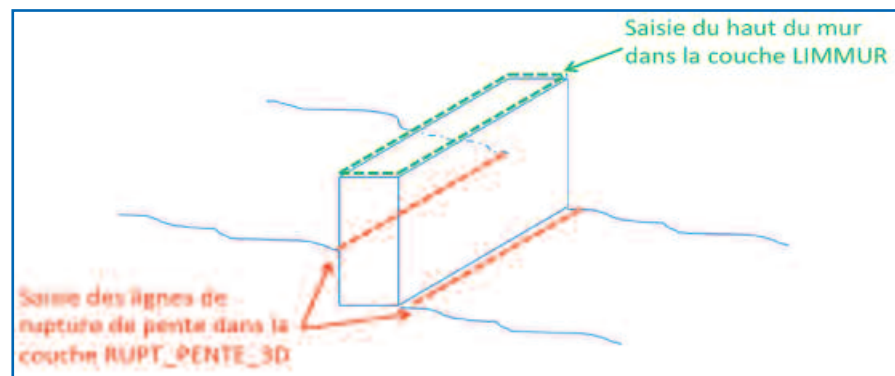


Figure 5. Exemple de restitution topographique classifiée permettant la modélisation du sol et de son sursol

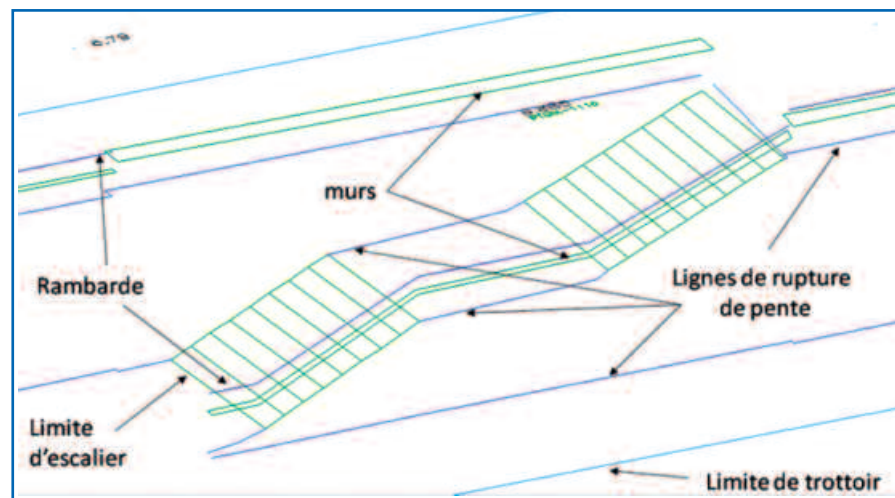


Figure 6. Illustration sous Autocad Map de la restitution photogrammétrique d'un escalier menant au niveau de la route depuis le port de Nice.

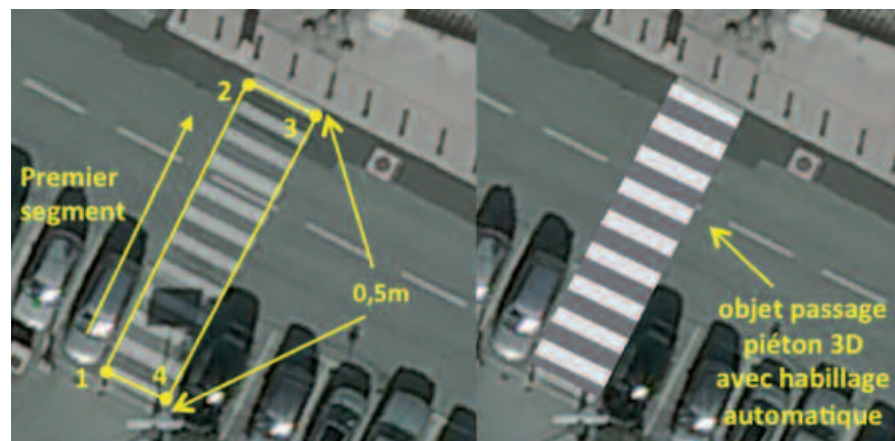


Figure 7. Méthodologie de restitution d'un passage piéton



Figure 8. Représentation schématique de la modélisation classifiée du sol et du sursol (avec et sans bâtiments)

Gestion et mise à jour des données

L'intégration de ces données dans le SIG de la Métropole Nice Côte d'Azur en permet la gestion et l'exploitation avec les autres données du SIG.

La base de données topographique obtenue par photogrammétrie est gérée sous Autocad Map (éditeur Autodesk) en utilisant un applicatif de gestion et de consultation (Toposerveur et Topoconsult de la société AEC Informatique), à l'instar des autres données topographiques terrestres de NCA. Elle est accessible à l'ensemble des utilisateurs de NCA sur environ 450 stations graphiques SIG, selon les mêmes modalités et avec les mêmes outils. Les utilisateurs sont précisément renseignés sur les caractéristiques de cette nouvelle donnée et ses limitations d'usage.



Afin de maintenir le plus possible l'actualité de cette couche d'information, un circuit de mise à jour est en cours de définition et sera rapidement mis en œuvre. Il consiste dans un premier temps à utiliser l'ensemble des nouveaux relevés topographiques réalisés par des méthodes terrestres, qui sont de précision supérieure. Des mises à jour plus globales de certains secteurs pourront également être envisagées ainsi que des partenariats d'échange ou des mutualisations.

En ce qui concerne le modèle 3D, sa structuration s'intègre parfaitement dans le modèle défini par l'Open Geospatial Consortium (OGC) et sa gestion s'effectue principalement au format CityGML, ce qui assure une grande pérennité et interopérabilité. Les éléments 3D sont gérés en utilisant les outils de la gamme ArcGIS (éditeur ESRI) ainsi que l'extension RCP (société Virtuel City). Les données peuvent ainsi être aisément sélectionnées et exploitées par différents logiciels en étant converties aux formats les plus appropriés des logiciels de modélisation ou de simulation utilisés. Les autres informations provenant du SIG comme les couches d'éclairage public ou de végétation sont également exploitées et complètent le modèle 3D. La donnée 3D fait alors partie intégrante du SIG et sa mise à jour, selon les catégories d'objets, s'intègre alors dans l'évolution globale du SIG.

Les nouvelles modélisations sont élaborées en suivant une structuration des éléments 3D. Cette structuration permet d'obtenir une homogénéité des données et donc une intégration cohérente avec les autres objets 3D du SIG. Une 4^e dimension est intégrée afin de gérer les projets d'aménagement : les futures réalisations sont gérées avec un attribut de date de réalisation prévisionnelle. Une fois le projet réalisé, celui-ci rejoindra les autres éléments de la base de données actuelle et remplacera sur le périmètre du projet les éléments existants. Cela ne pose aucune difficulté pour tous les objets à l'intérieur du périmètre, mais le raccordement entre le terrain actuel et le terrain futur est plus délicat. Des travaux sont en cours pour déterminer les méthodes

de travail qu'il faudra mettre en œuvre en amont pour faciliter la gestion de ces "coutures".

D'une manière plus générale, des mises à jour du modèle, des augmentations des niveaux de détail et de définition peuvent aussi être effectuées sur certains secteurs. Les échanges de données ou les mutualisations sur des projets communs, sont quant à eux d'autant plus simples qu'une cohérence de la précision et de la structuration peut être facilement trouvée.

Quelques exemples d'utilisation

A des fins d'illustration, deux exemples d'utilisations sont présentés ci-après, l'un concernant une modélisation immersive utilisée pour visualiser des projets, à des fins d'aide à la décision, et l'autre concernant une exploitation plus scientifique de la modélisation 3D de NCA.

La *Figure 9* présente la modélisation immersive qui a pu être réalisée très rapidement à partir de la modélisation 3D fine et classifiée de la zone autour du parking Sulzer à Nice. Les projets modélisés peuvent être intégrés immédiatement dans l'environnement de cette maquette. Le gain de temps est considérable puisque les éléments du modèle existant ont un niveau de précision et de réalisme qui permet d'obtenir rapidement un rendu immersif de qualité.

La *Figure 10* illustre, quant à elle, des recherches menées par l'Université de

Nice Sophia-Antipolis - Polytech' Nice, sur la qualité des résultats qui peuvent être obtenus dans des simulations hydrauliques de ruissellement de surface pour des sites industriels, en exploitant une modélisation 3D fine du terrain et de son sursol. Le modèle 3D est exploité et la figure présentée ici, illustre le niveau maximal d'eau atteint durant la simulation.

Conclusion

Bien que la conception et la mise en œuvre du processus de fabrication de la donnée photogrammétrique adéquate et la génération du modèle 3D restent assez complexes, le résultat qui a été obtenu correspond parfaitement aux objectifs recherchés : la donnée topographique de précision exploitée dans le cadre d'une modélisation 3D d'un territoire permet d'obtenir un modèle 3D de plus grande qualité en terme de précision, de structuration et d'exhaustivité, et donc de mieux répondre aux différents besoins.

Un tel niveau de précision et de structuration n'avait jusqu'à présent jamais été réalisé pour une modélisation d'un si grand territoire. La structuration des données mise en œuvre permet techniquement de faciliter l'exploitation du modèle dans les différents outils de modélisation et de simulation 3D. Cette classification qui s'intègre également dans la démarche de normalisation OGC, contribue à la pérennité de la donnée et à son interopérabilité. La précision du modèle, associée à sa



Figure 9. Exemple de modélisation immersive de l'existant exploitable à des fins d'aide à la décision, pour des projets d'aménagement.

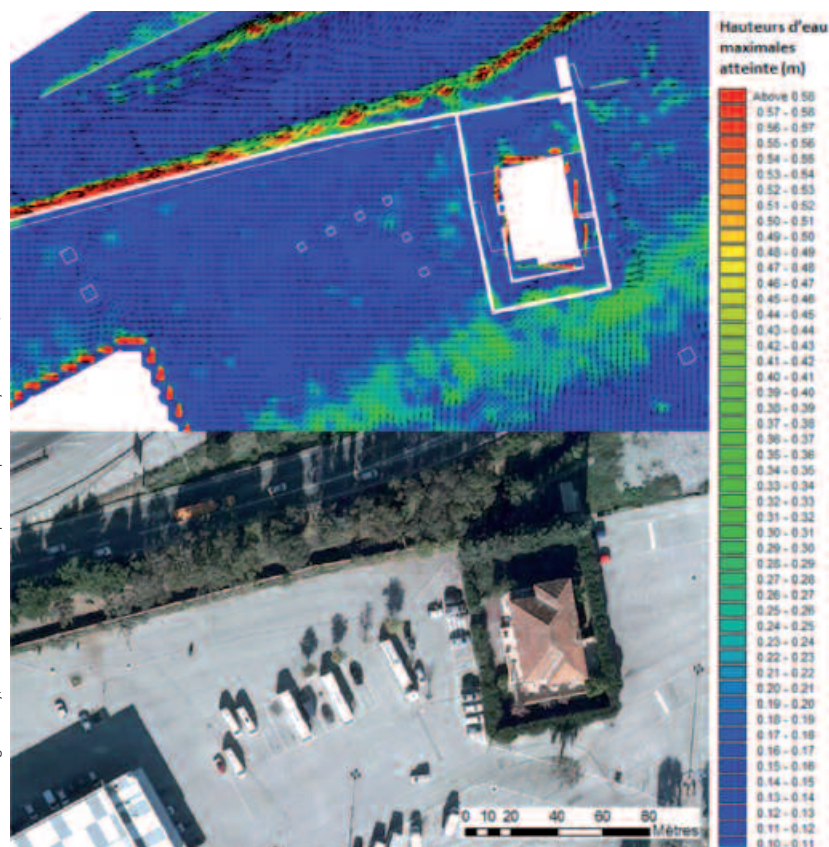


Figure 10. Hauteur d'eau maximale atteinte durant une simulation hydraulique de ruissellement de surface exploitant le sol et le sursol du modèle 3D de NCA

structuration, sont particulièrement intéressantes puisqu'elles contribuent à en développer la multiplicité des usages. En effet, le modèle 3D permet à la fois les rendus visuels de qualité souvent recherchés pour la communication et l'aide à la décision, mais également des exploitations plus techniques et scientifiques, pour lesquelles la précision de la donnée et la structuration sont des critères importants. ●

Remerciements

Je remercie MM. Florent Langeron et Guillaume Tacet de la Direction Information Géographique de NCA, pour leur investissement et la qualité de leur travail, ainsi que les sociétés Astrium, Virtuel City et AEC Informatique qui ont accompagné cette aventure professionnelle.

Je remercie très sincèrement M. Antoine Vêran, Maire de Levens et Président de la Commission Nouvelles Technologies de la Métropole Nice Côte d'Azur pour son soutien précieux et indispensable dès l'origine de ce projet.

Je remercie également M. Patrick Guével, Directeur Général des Services Techniques de NCA pour l'intérêt immédiat qu'il a manifesté à ce projet et à ses applications, ainsi que pour avoir permis et soutenu sa réalisation.

Je remercie M. Pitout, Directeur Général Adjoint et M. Protte, responsable du Service Applications Géographiques pour leur aide.

Enfin je remercie la Commission européenne d'avoir retenu et subventionné ce projet dans le cadre du FEDER pour son caractère innovant.

Contact

Ludovic ANDRES
Direction Information Géographique
Métropole Nice Côte d'Azur
Chercheur Associé
URE Innovative City / Polytech'Nice
Université de Nice Sophia Antipolis
ludovic.andres@nicedazur.org

Références

Andres, L. 2002, *Conversion dans le système altimétrique IGN69 de la base de données*

topographiques de la Ville de Nice, XYZ n°91, Juin 2002.

Andres, L. 2003, *Transformation dans le système R.G.F. 93 de la base de données géographiques de la Ville de Nice*, XYZ n°97, Décembre 2003.

Arrêté du 15 février 2012, pris en application du chapitre IV du titre V du livre V du code de l'environnement relatif à l'exécution de travaux à proximité de certains ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques de transport ou de distribution, JORF n°0045 du 22 février 2012 page 2988, texte n° 10.

Arrêté du 16 septembre 2003, *Portant sur les classes de précision applicables aux catégories de travaux topographiques réalisés par l'Etat, les collectivités locales et leurs établissements publics ou exécutés pour leur compte*, Journal Officiel de la République Française, n°252 du 30 octobre 2003, page 18546.

3dOk, 2011, *Charte d'éthique de la 3D*, <http://www.3dok.info/3DOKdrupal6/sites/default/files/3dok-La-charte-HR-FR.pdf>, Juillet 2011.

Irschara, A., Rumpler, M., Meixner, P., Pock, T., Bishof, H., 2012, *Efficient and globally optimal multiview dense matching for aerial images*, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-3, 2012.

Laurini, R., Servigne, S., 2008, *Panorama des potentialités SIG en trois dimensions : vers des modèles virtuels 3D de villes*, XYZ n°114, Mars 2008.

Pornon, H., 2009, *La 3D et les SIG : Etat de l'art et perspectives*, Géomatique Expert N°71.

Stamos, I., Allen, P. K., 2002, *Geometry and Texture Recovery of Scenes of Large Scale*, Computer Vision and Image Understanding 88, 94-118 (2002)

ABSTRACT

Few experiments have been made to create 3D classified models of large territories with high level of details and high precision. This paper presents the Nice Côte d'Azur approach to produce structured photogrammetric mapping data in order to generate large scale high definition classified 3D models. Such data are particularly suited and ready to use, for 3D immersive applications like urban planning decision support, or for technical or scientific applications like runoff simulations.