

Relevé, Modélisation 3D et intégration SIG d'ouvrages d'art pour le projet Genève 3D

■ David DESBUISSON - Christian HALLER - Laurent NIGGELER - Thierry SANGOUARD

■ MOTS-CLÉS

laser scanner mobile, lasergrammétrie, modélisation 3D, modèle 3D texturé, SIG 3D.

Le canton de Genève a débuté, vers 1985, une imposante saisie de plusieurs centaines de millions de métadonnées 2D, centralisées aujourd'hui dans une seule base géographique SIG, ESRI, de notoriété mondiale, accessible gratuitement via internet (www.sitg.ch).

Parmi les quelque 500 couches actuellement à disposition, certaines d'entre elles (parcellaire, bâtiments, ...) ont la "foi publique" autrement dit force juridique.

Depuis quelques années, la troisième dimension devient manifestement un outil de politique publique, tant pour ce qui concerne la gestion du territoire au quotidien, que pour

la compréhension des projets d'aménagement, la concertation entre les collectivités, les élus, la population et la prise de décisions durables. L'ampleur des possibilités offerte par la 3D permettrait presque de contredire le principe fondamental selon lequel "la carte n'est pas le territoire".

Genève et les données 3D [NIG08]

L'administration genevoise a confié au Service de la mensuration officielle (SEMO) le projet pour l'acquisition et la mise à disposition de manière coordonnée et efficace d'un socle de données tridimensionnelles au sein et en complément de son actuel SIG deux dimensions. Ce socle 3D est notamment constitué des bâtiments, des infrastructures de transport, des ouvrages d'art, de la signalisation et de la végétation.

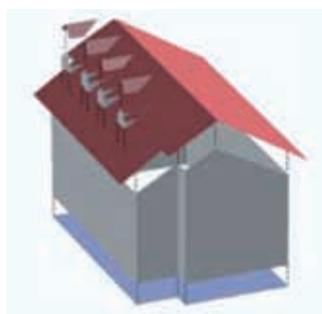


Figure 1. Bâtiment 3D.

La première grande étape 3D fut lancée en 2008 par la saisie des quelque 76 000 bâtiments du Canton, à construire dans le modèle de données (Figure 1) composé d'une base, des façades, du toit principal et des superstructures. Des attributs judicieux offrent de très nombreuses possibilités de gestion.

Ces bâtiments ont été acquis sur la base d'un relevé photogrammétrique cantonal existant avec une résolution des images de 16 cm. Après modélisation et avant intégration officielle dans le SIG, le SEMO effectue des contrôles minutieux, comprenant principalement :

- une vérification systématique de la précision des données livrées,
- une dizaine de tests topologiques (interpénétrations des volumes, sens de saisies des faces, étanchéité du modèle 3D...).

La problématique particulière des ouvrages d'art et passages couverts

L'étape Bâti 3D en cours de finalisation, il était nécessaire d'acquérir une vingtaine d'ouvrages d'arts, pour alimenter des projets d'urbanisation conséquents. Aucun ouvrage d'art ne peut être extrait, contrairement aux bâtiments, des données photogrammétriques aéroportées :

- les tunnels sont évidemment absents des images acquises par avion,
- le tablier des ponts fait office de masque et interdit la reconnaissance des parties porteuses des ouvrages.

Le SEMO a retenu pour ces ouvrages, le groupe constitué de : SPATIAL SA, société de géomatique, TPLM-3D société de lasergrammétrie et modélisation 3D, Christian Haller Ingénieur géomètre officiel genevois et DEPTH SA, société informatique.

La majorité des ouvrages à mesurer et modéliser dans le système national suisse MN03-GE, se situe sur réseau autoroutier pour lequel un arrêt de la circulation est problématique.

L'analyse s'est faite au vu des critères de sélection suivants :

- la sécurité des opérateurs et usagers,
- une précision planimétrique et altimétrique de 15 cm,
- la densité d'information, uniforme et suffisante,
- le coût.

Plusieurs méthodologies de relevé ont été testées et écartées successivement :

- le laser scanner aéroporté ne pouvait répondre au besoin pour les raisons invoquées plus haut pour la photogrammétrie.

- ▶ le laser scanner fixe répondait à deux critères seulement : la précision et la densité.
- ▶ la modélisation sur la base des plans d'exécution ne garantissait aucune précision sur le résultat.

Le laser scanner mobile terrestre, seule méthode respectant tous les critères, a été logiquement retenue. Ce procédé repose schématiquement sur des mesures combinées GPS, centrale inertielle et scanners. La précision annoncée par ces systèmes est de l'ordre de 3 - 5 cm (sous réserve d'une bonne couverture GPS). Avec une vitesse de circulation réduite à 60 km/h, la densité est de l'ordre de 1 point / 3 cm. La méthode est rapide, même si elle requiert des missions minutieuses de mesure de points d'encadrement des données en plus de la capture du nuage de points.

Ce procédé, dans les tunnels, ne permet pas cependant de garantir la précision des points mesurés. Le signal GPS est en effet interrompu, pendant plusieurs dizaines de secondes, voire plusieurs minutes. Une campagne complémentaire de mesure théodolite de points d'encadrement aurait donc été indispensable en complément mais était soit interdite pour des raisons de sécurité, soit très onéreuse. Le SEMO a finalement accepté que la précision, pour ces ouvrages souterrains, soit quantifiée a posteriori, par des campagnes de mesures théodolites, à effectuer lors de la fermeture d'entretien annuelle des tunnels. En vue d'obtenir le meilleur résultat possible, compte tenu des conditions, deux passages ont systématiquement été réalisés par tunnel.

Relevé par méthode laser scanner mobile

Le système StreetMapper de la société 3D laser mapping a été utilisé pour ce projet. Il est composé de deux lasers scanner Riegel, d'une antenne GPS et d'une plate-forme inertielle. Le positionnement GPS a été réalisé en cinématique différentielle ; en l'occurrence, sur l'antenne permanente du SEMO, située au centre de Genève.

Le calcul rigoureux de la trajectographie est un des points clés de la méthode laser scanner mobile. Tout problème à ce niveau rend les données totalement inexploitable. Pour atteindre une meilleure précision que par le simple calcul de la trajectographie (GPS + plate-forme inertielle), des points identifiables dans le nuage de points ont été relevés sur le terrain en GPS temps réel (liaison GSM sur l'antenne du SEMO). Selon les critères de qualité du SEMO, cette mesure s'est faite par double session GPS décalée dans le temps. Ces points ont permis d'affiner la



Figure 2. Le Système Street Mapper de 3D Laser Mapping.



Figure 3. Ensemble des données capturées sur fond d'orthophoto.

trajectographie. La précision finale du nuage de points livré est de 4 - 5 cm hors tunnels.

Sur un chantier de cette ampleur, une vingtaine de points GPS aurait suffi à affiner le positionnement du nuage de points. Nous en avons mesuré environ 120 (6 par ouvrage en moyenne), ceci permettant de conserver une partie de ces points pour un contrôle indépendant du nuage de points final transmis par le prestataire.

La trajectographie a été également affinée par ajout de points de jonction entre les différents passages du système laser. Ces points sont particulièrement importants pour assurer l'homogénéité du nuage de points dans les tunnels.

Contrôle des données

Le nuage de points est la donnée de base. Nous nous sommes assurés de son homogénéité et de sa précision avant la modélisation. Ce projet étant une première à Genève, nous avons particulièrement insisté sur cette phase de contrôle.

Le système StreetMapper donne une précision a priori de la trajectographie. Cette précision est calculée par le système au moment de la mesure et n'est pas à confondre avec la précision finale des données. En effet, ce premier résultat ne tient pas compte des points de calage GPS utilisés en post-traitement pour affiner la position du nuage.

La Figure 4 représente l'évolution de la précision du positionnement lors de la mesure. Il est intéressant d'analyser ces données et de les cartographier. Ceci permet de contrôler que les mesures ont été faites dans de bonnes

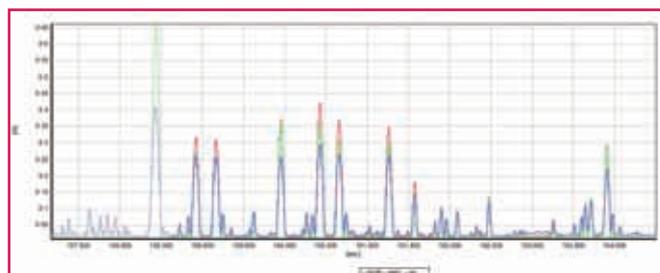


Figure 4. Graphique des précisions brutes estimées par l'INS.

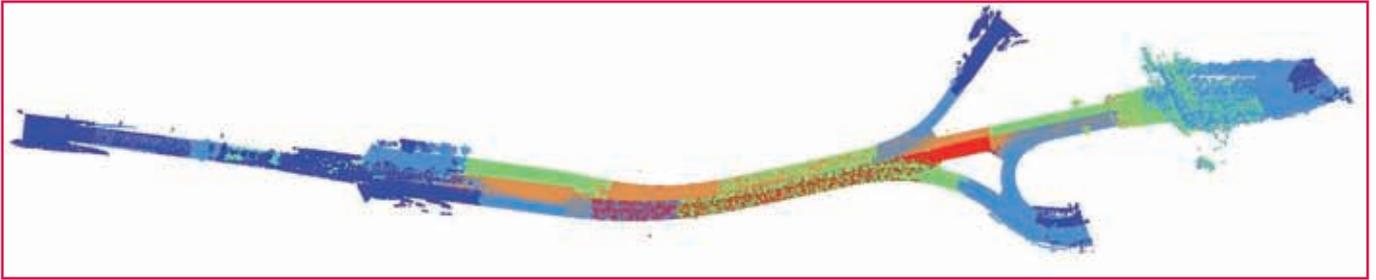


Figure 5. Colorisation du nuage de point par classe de précision - Tunnel des communes réunies
en bleu marine : 0-5 cm ... ; en rouge : plus de 20 cm.

conditions (en particulier du point de vue de la constellation GPS). Le résultat escompté est une trajectoire de bonne ou très bonne précision hors tunnel et bien évidemment de précision dégradée dans les tunnels. Un module a été écrit, permettant de colorier le nuage de points par classe de précision en fonction du fichier de données de précision, la donnée commune étant le temps GPS.

Un second contrôle a porté sur les points de calage GPS. L'ensemble de ces points a été modélisé dans le nuage de points mobile final. Les écarts entre les coordonnées nuage et GPS ont été analysés. Parmi ces points, certains ont été fournis au prestataire, il convient de vérifier qu'ils ont bien été pris en compte ; d'autres non transmis permettent de quantifier la précision des données. L'écart-type résultant est de l'ordre de 3 - 4 cm (hors tunnel) sans distinction notable entre les points utilisés pour le calage et les autres. La précision fournie a priori par le prestataire semble donc bien respectée.

Un troisième contrôle a consisté à extraire des coupes à intervalle régulier dans le nuage de points. En chaque endroit, le nuage est composé de plusieurs passages du système laser scanner mobile ; pour chaque sens de circulation et parfois même des passages redondants. Les nuages issus de ces différents passages doivent être confondus. Les coupes dans le nuage nous ont permis de le contrôler efficacement. Tout écart supérieur à 3 - 4 cm a fait l'objet d'une demande de reprise de la zone concernée pour affinage de la trajectographie.

Nous avons besoin d'un contrôle absolument indépendant pour assurer la précision des données livrées. Plusieurs scans fixes ont donc été réalisés avec une ScanStation II de Leica Geosystems (deux par ouvrage d'art en moyenne). Ils ont été recalés sur le système du cadastre genevois (MN03-GE) par polygonation rattachée aux repères officiels locaux. A partir

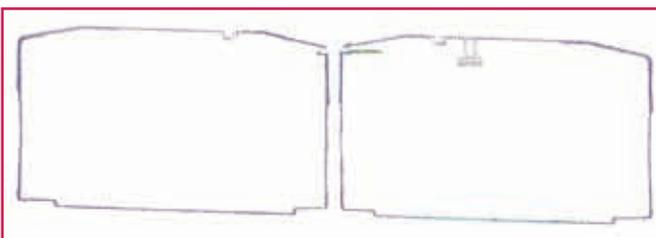


Figure 6. Contrôle de l'homogénéité des nuages de points par coupe régulière dans le nuage

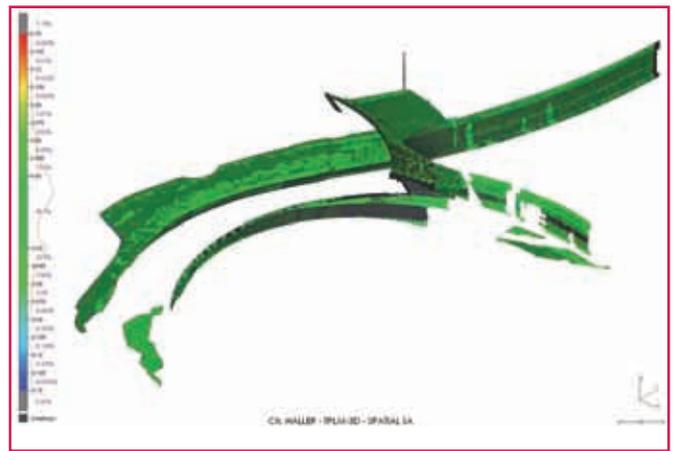


Figure 7. Contrôle par comparaison : Scan Fixe / Scan Mobile.

de ces nuages, considérés comme référence, nous pouvons mailler des objets caractéristiques. Le nuage de points mobile a été comparé, sous 3D Reshaper, à ces maillages et les écarts, cartographiés. Ces contrôles ont confirmé un écart-type de l'ordre de 4 - 5 cm avec la présence de quelques systématismes, dus très certainement à la différence de méthode de rattachement au système MN03-GE (méthode GPS cinématique différentiel pour le scan mobile et polygonation rattachée aux repères locaux pour le scan fixe).

Un dernier élément de contrôle s'est présenté pendant le projet, nous avons eu l'opportunité d'effectuer des mesures dans le tunnel de Carouge lors de sa fermeture, une nuit, pour entretien. Une série de cinq profils a été relevée par méthode tachéométrique et comparée au nuage de points. Les écarts constatés ont été de 10 cm maximum pour un tunnel de 450 m de long. Le tunnel avait été parcouru deux fois dans chaque sens de circulation lors du relevé laser scanner mobile. Ce contrôle ne permet pas pour autant de quantifier la précision de la méthode laser scanner mobile en tunnel d'une manière générale. Une mesure indépendante par ouvrage souterrain sera nécessaire.

Modélisation 3D des ouvrages

Le deuxième objectif du projet était de modéliser les ouvrages sur la base du nuage de points mobile validé, le SEMO ayant fourni le modèle de données suivant à respecter :



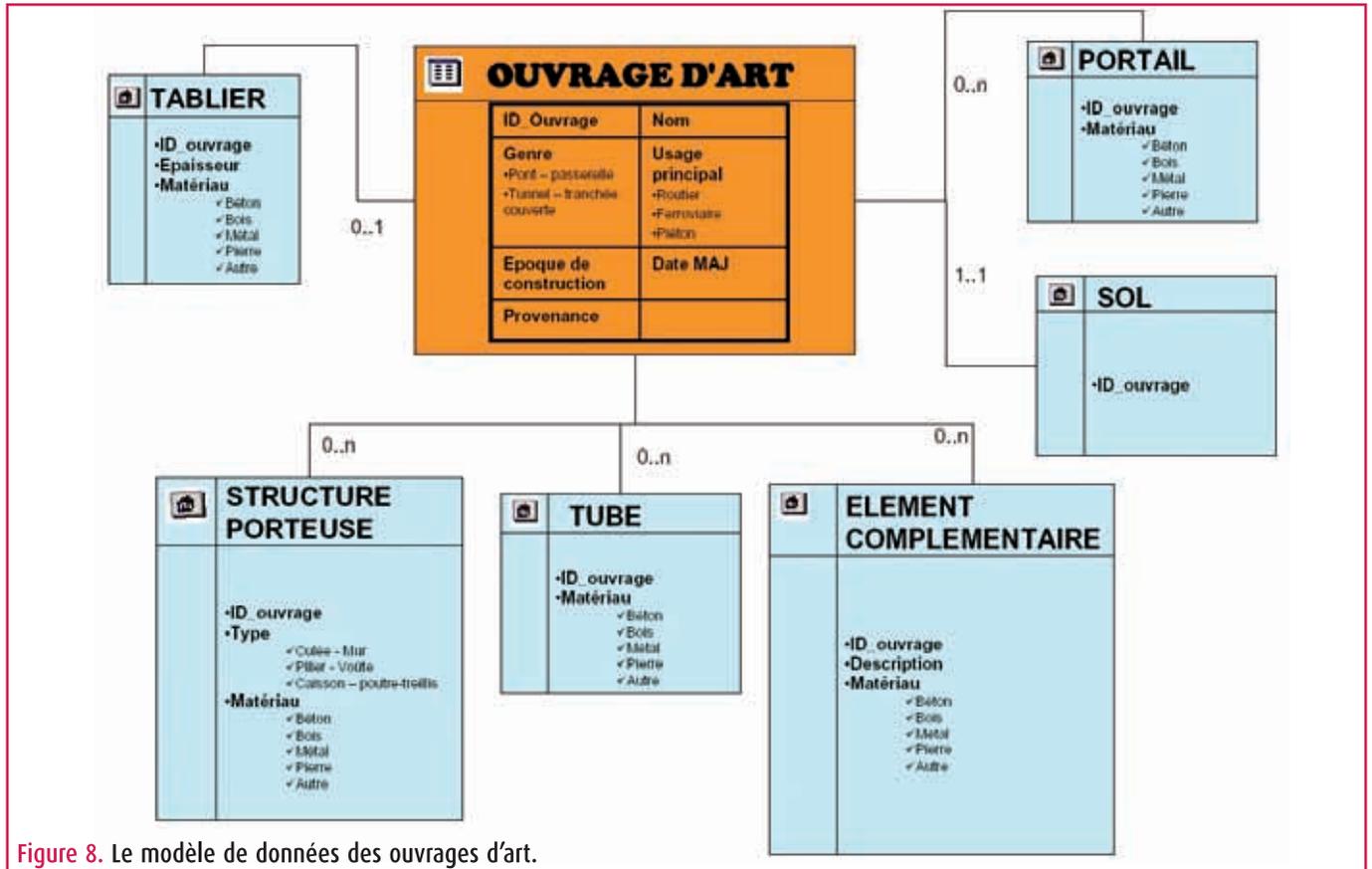


Figure 8. Le modèle de données des ouvrages d'art.

► La méthode de modélisation et de texturisation utilisée est issue d'un programme de recherche et développement propre à TPLM-3D [FAB05] [RAV06] [RAV07] [WIL09]. Elle a pour objet de modéliser des objets architecturaux complexes en respectant leur logique propre et en générant un modèle léger et topologiquement correct. La méthode se décompose en trois étapes :

- Extraction des primitives géométriques.
- Reconstruction d'une 3D surfacique à partir du squelette 3D.
- Texturisation générique ou photo réaliste suivant les cas.

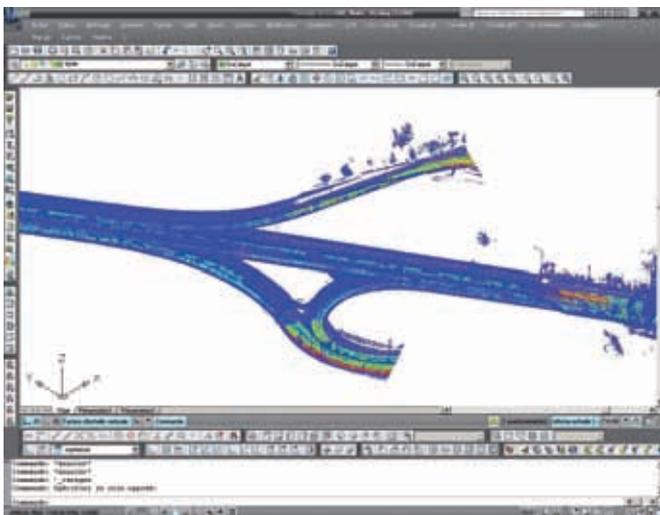


Figure 9. La gestion du nuage de points sous AutoCAD avec le plugin Leica CloudWorx.

Les primitives géométriques sont extraites à partir du nuage de points sous AutoCAD / Leica CloudWorx. Cela nécessite une réflexion préalable sur la décomposition de l'ouvrage en objets élémentaires, en fonction de son architecture. Le bon choix des primitives géométriques est essentiel pour la qualité et la fidélité du modèle final. Cette extraction consiste à aller chercher, dans le nuage de points, les lignes caractéristiques minimales permettant de représenter fidèlement l'objet. Ce travail peut être comparé à celui du géomètre lors d'un levé tachéométrique classique. Il convient d'extraire le minimum de lignes et de points tout en permettant de garantir la précision et l'exhaustivité (application du cahier des charges).

Cette étape est peu automatisée. Des pistes sont pourtant ouvertes par les logiciels du marché et par la recherche universitaire [FUC06]. L'automatisation de l'extraction des lignes caractéristiques donne encore des résultats peu convaincants du point de vue de la qualité pour notre application. Il faut savoir "caricaturer" dans la limite évidente

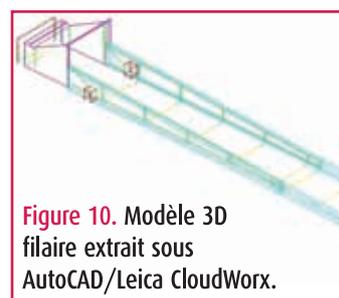


Figure 10. Modèle 3D filaire extrait sous AutoCAD/Leica CloudWorx.

de la précision recherchée ce que les logiciels ne savent pas encore faire correctement. Des pistes très prometteuses sont déjà présentes dans PolyWorks et dans 3D Reshaper. Pour des problèmes de qualité, il ne nous a pas été possible de les utiliser pour ce projet.



La reconstruction 3D a été réalisée sous 3dsMax. Il s'agissait de créer des objets surfaciques à partir du squelette filaire. Pour l'essentiel, ce travail a été rapide. Certaines opérations de reconstruction 3D se sont avérées complexes comme par exemple, la création d'une ligne d'intersection de deux volumes relativement simples. En conséquence ces lignes complexes n'ont pas été extraites sous AutoCAD / Leica CloudWorx. Les deux volumes ont été modélisés séparément et leur intersection a été obtenue par une opération booléenne sous 3dsMax. Ces opérations sont délicates et réclament savoir-faire et expérience.

Lors de cette modélisation, nous avons porté un grand soin aux intersections et relations topologiques entre les objets :

- les faces doivent être modélisées dans le bon sens, la normale doit pointer vers l'extérieur de l'objet ;
- chaque face doit comporter trois sommets distincts ;
- les limites inter objets doivent contenir les mêmes sommets sur les deux objets adjacents ;
- un objet ne doit pas en perforer un autre.

Le respect de ces règles a été assuré par un contrôle topologique indépendant réalisé après intégration dans le SIG ESRI. Les erreurs identifiées ont fait l'objet d'un rapport et ont été corrigées.

La texturisation des modèles 3D est de deux natures différentes :

- texture générique (aplat de couleur), cette méthode est suffisante pour toutes les surfaces type bitume ou béton, où le plaquage de texture réaliste n'apporterait rien et pour lesquelles les logiciels de rendu disposent d'excellentes bibliothèques de texture permettant des rendus esthétiques et fidèles à la réalité. On évite ainsi de surcharger la base de données finale sans pour autant nuire à la fidélité de la représentation.
- texture réaliste par projection de photographie orientée, cette méthode s'impose pour les parties plus particulières (fresque, mosaïque, matériaux à texture complexe).

Les aplats de couleur ont été rapidement choisis en fonction d'un reportage photographique effectué pendant les mesures terrain.

La texture réaliste a nécessité de mettre en œuvre un processus photogrammétrique. ImgSurveyor, un logiciel développé par TPLM-3D pour ses besoins internes, a été utilisé à cet effet.

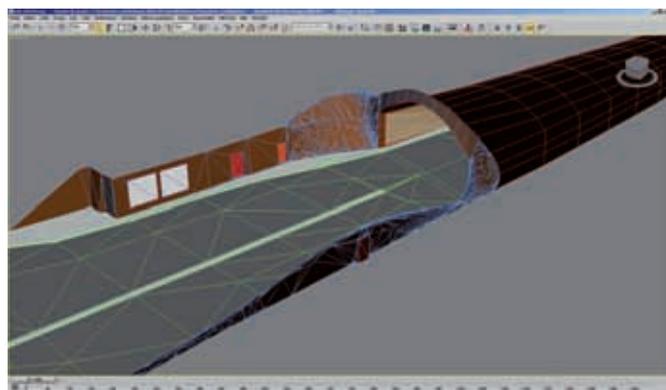


Figure 11. Modèle 3D surfacique sous 3dsMax.

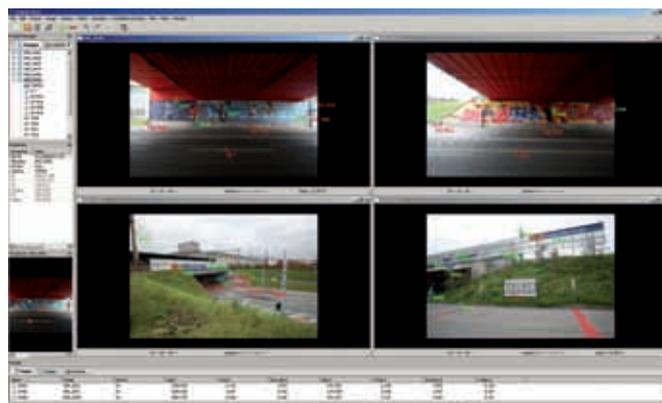


Figure 12. ImgSurveyor, logiciel photogrammétrique.

Schématiquement, ImgSurveyor réclame une mission de prise de vues et de mesure de points de contrôle, sur le terrain. Pour chaque photographie nous avons besoin de deux ou quatre points de calage (deux dans le cas où le centre de projection est relevé en XYZ). ImgSurveyor calcule ensuite le projet globalement par la méthode des faisceaux.

Les données des caméras orientées sont exportées vers 3dsMax. Pour ce faire, les photographies sont corrigées de toutes leurs distorsions : point principal repositionné au centre de l'image et correction des distorsions radiales. En effet 3dsMax considère que celles-ci sont parfaites, dans son module Caméra.



Figure 13. Caméra injectée sous 3dsMax.

Sous 3dsMax, les caméras servent de projecteurs pour texturer les objets et, à quelques manipulations de mosaïque près, le modèle 3D est alors prêt pour toutes les applications de rendu et de maquettage.

Basculement vers le monde du SIG

Si 3dsMax est l'un des meilleurs modélisateurs 3D, il ne comporte pour autant pas de fonction d'export vers les plates-formes SIG, ni de possibilités natives de basculement d'un système en coordonnées locales vers des coordonnées nationales. Le logiciel est principalement utilisé pour l'imagerie 3D et l'architecture, les applications géomatiques y sont extrêmement marginales.

Après réflexion et étude des possibilités existantes, le développement d'un plugin d'export sous 3dsMax est apparu comme la seule option satisfaisante. Cette solution permettait beaucoup de souplesse, une maîtrise de l'affectation des différentes géométries du modèle 3D dans les diverses tables



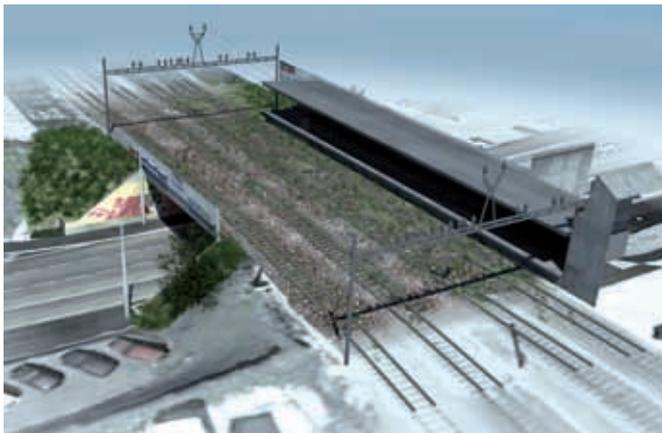


Figure 14. Rendu final – Pont rouge de Lancy.

► de la base de données du SEMO et une grande simplicité d'utilisation après développement.

Spatial SA a donc développé cette application avec DEPTH SA, spécialiste notoire de développements sous ESRI et 3dsMax.

Une convention de répartition des objets en couches sous 3dsMax a permis de les classer dans les classes ad hoc sous ESRI. Le plugin transfère l'ensemble des géométries sous ESRI mais également les aplats de couleur et les textures réalistes. Les ouvrages d'art ont ainsi tous été livrés en géodatabase multi patch ESRI, selon le cahier des charges.

Conclusion

Ce projet complexe a nécessité l'énergie cohérente de spécialistes solidaires et très impliqués.

Genève, bénéficiant de son organisation SIG 2D, dispose aujourd'hui, dans une seule et même base géographique ESRI 2D / 3D, de données cohérentes, précises et fiables.

La qualité des données est essentielle pour un usage crédible, reconnu par tous. Pour établir des règles de l'art claires pour la 3D, le Service de la mensuration officielle genevois a en 2008, initialisé une commission franco-suisse pour une éthique 3D irréprochable. Ces travaux réalisés en coopération avec l'Institut géographique national français et l'Association genevoise des géomètres ont débouché sur la rédaction d'une charte 3D. De nombreux nouveaux acteurs, franco-suisse mais aussi d'autres nationalités, se sont manifestés pour adhérer au principe. Cette charte doit se signer à Monaco, le 4 février 2010.

Les modèles et socles tridimensionnels ne sont qu'aux prémices de leur vie. Dans un avenir proche, nous ne parlerons plus de maquette numérique 3D mais de territoire en 3D, montrant ainsi que la 3D sera devenue un véritable outil de gestion dans de nombreux domaines.

Une partie des collectivités territoriales sont prêtes aujourd'hui à utiliser la 3D, sous forme de visualisation animée numérique ; elles seront demain, prêtes également à travailler en 3D. De nouveaux services inédits naîtront en aval de ces données. ●

Bibliographie

[FAB05] Fabry Vincent - *Réalisation de modèles 3D texturés type réalité visuelle à partir de données lasergrammétriques et photogrammétriques (TPLM-3D)* - mémoire de PFE INSA Strasbourg, septembre 2005.

[RAV06] Ravier Céline - *Étude comparative des différentes méthodes de modélisation 3D à partir de données laser scanner terrestre et analyse de la précision finale des modèles 3D texturés (TPLM-3D)* - mémoire de PFE INSA Strasbourg, septembre 2006.

[FUC06] Fuchs Alain - *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique* - Thèse en science de l'architecture, septembre 2006.

[RAV07] Ravier Céline - *Représentation 3D architecturale du temple d'Auguste et Livie à Vienne* - xyz n°112, 3^e trimestre 2007.

[WIL09] Willaume Bertrand - *(TPLM-3D) Amélioration de la productivité et de la qualité du processus de réalisation des orthophotos à partir de données laser scanner et photogrammétriques dans ImgSurveyor* - mémoire de PFE INSA Strasbourg, septembre 2009.

[NIG08] Niggeler Laurent - *La 3D comme outil d'expertise, de décision et de communication* - Bulletin e-geo.ch, Octobre 2008; www.e-geo.ch/internet/e-geo/fr/home/publi/nletter.html.

[NIGSAN09] Niggeler Laurent, Sangouard Thierry - *Après le bâti 3D, au tour des ponts et tunnels de prendre du volume* - Bulletin e-geo.ch, Juillet 2009; www.e-geo.ch/internet/e-geo/fr/home/publi/nletter.html.

Contacts

David DESBUISSON TPLM-3D, Ingénieur géomètre ENSAIS et cogérant. www.tplm-3d.fr

Christian HALLER Bureau d'études Christian HALLER, Ingénieur du génie rural et géomètre EPFL, Ingénieur géomètre officiel à Genève. www.haller-sa.ch

Laurent NIGGELER Service de la mensuration officielle (SEMO), Département du territoire, Genève, Ingénieur géomètre cantonal et directeur. www.ge.ch/sem0/3D

Thierry SANGOUARD
SPATIAL SA, Ingénieur géomaticien et directeur. www.spatial.ch

Liens : Depth SA - www.depth-sa.ch

SITG - Système d'Information du Territoire Genevois - www.sitg.ch

ABSTRACT

The Canton of Geneva is engaged for some years in a massive measurement of 3D data for its GIS. After the integration of some 76000 buildings using photogrammetric method, it was decided to capture and to modelize about twenty engineering structures; bridges and tunnels. This mission was entrusted to a grouping of company: Spatial SA, TPLM-3D and the Christian Haller Office. The in-depth study of the specifications allowed to turn to a measurement by mobile 3D laser scanning. This was the first time this method was used on the canton of Geneva, for this reason, the implemented controls were particularly exhaustive. The 3D modelling was made based on a method developed for a long time by TPLM-3D, allowing to obtain accurate and faithful 3D models. The last stage of the project consisted in integrating the 3D models into the ESRI GIS.