

# Construction et intégration de maquettes 3D dans un SIG

Mathieu KOEHL / Osama DARWISH

Equipe MAP-PAGE UMR 694  
INSA de Strasbourg  
24, Boulevard de la Victoire  
67084 Strasbourg Cedex

[mathieu.koehl@insa-strasbourg.fr](mailto:mathieu.koehl@insa-strasbourg.fr)

## Résumé

Les modèles numériques tridimensionnels urbains représentent souvent le modèle de base d'un système d'information topographique (SIT) ; ainsi, la précision du SIT est directement à mettre en relation avec celle du modèle qui lui sert de support. Jusqu'à présent, la photogrammétrie numérique aérienne est considérée comme l'une des techniques la plus performante et la plus employée dans le cas de la génération de maquettes numériques 3D dans un environnement urbain. Le développement croissant des techniques d'acquisition de type LIDAR et les procédures d'extraction d'objets 3D constituent à présent une seconde source très importante de modèles tridimensionnels urbains. Ce projet relate l'un des aspects des Systèmes d'Information Géographique 3D consistant à créer une base de données tridimensionnelle en partant de la restitution structurée d'éléments de toits à partir d'images photogrammétriques aériennes puis d'en déduire automatiquement un modèle tridimensionnel. La base de données 3D propose une structure contenant les aspects sémantiques mais également tous les aspects géométriques des objets 3D. Nos objectifs sont ainsi de réduire le temps des opérations de restitution puis de reconstruire les bâtiments à toits plans en utilisant un processus automatisé. Le traitement général comporte trois phases principales : la génération des toits, puis la reconstruction des façades et finalement l'association de textures. Pour l'étape de reconstruction des toits une méthode a été développée ne nécessitant pas de prétraitements topologiques des pans des toits. Les pans des toits sont reconstruits par triangulation en utilisant localement les algorithmes de génération de Modèle Numérique de Terrain (MNT-TIN). Certains éléments constitutifs des toits qui ne sont pas restitués sont reconstitués automatiquement et les toits sont reconstruits entièrement. De plus, la méthode développée génère automatiquement les polygones des faces des toits. Dans la deuxième étape, nous utilisons une projection verticale pour la reconstruction des murs de façade à partir des contours de toit. La projection verticale est effectuée sur une surface de référence qui est soit un MNT – dans le cas de la construction des murs principaux – soit un autre élément de toit donnant alors lieu à des murs d'étages supérieurs dans le cas de bâtiments à plusieurs niveaux. A la fin de cette dernière étape, la surface du sol (MNT) est re-triangulée pour assurer la cohérence entre les éléments du sol et les traces au sol des façades reconstruites dans le modèle. Ces différentes applications ont été programmées en utilisant les bibliothèques de développement sous VBA dans l'environnement 3D d'*ArcScène 9.1 (ESRI)* complément du module *3D Analyst 9.1 (ESRI)*.

## 1. INTRODUCTION

Les demandes croissantes en informations 3D dans les différentes applications urbaines (maquettes numériques, planification urbaine) ont entraîné la définition et l'implémentation de nombreux modèles et méthodes de gestion. On en retrouve un bon exemple dans le développement des systèmes d'information municipaux pour lesquels l'utilisation d'objets 3D devient de plus en plus importante. Les SIG 2D et 2.5D n'étaient plus suffisants et ne permettaient plus de répondre à toutes les nouvelles spécifications demandées par la 3D. Par conséquent, ce sont les systèmes de DAO, offrant depuis longtemps la 3D qui ont été utilisés très largement dans le cadre de l'étude des aménagements urbains. Ces systèmes de DAO 3D contiennent des outils de visualisation 3D, des liaisons avec des bases de données pour l'analyse sémantique mais sont limités dans le domaine de l'analyse spatiale 3D. Les SIG 2D et 2.5D par contre intègrent la topologie 2D, mais sont relativement restreints en algorithmes d'analyse spatiale 3D. Pour pallier ces manques, les solutions commerciales combinent alors différents produits pour augmenter les possibilités du système. Le projet décrit dans cet article consiste à concevoir une structure pour un SIG 3D pour la gestion de modèles 3D et particulièrement de modèles 3D urbains. Le processus choisi pour l'acquisition des données est la photogrammétrie aérienne. Mais l'acquisition des données ne constitue pas le sujet principal du projet relaté. L'une des étapes les plus importantes développée est le processus de reconstruction des bâtiments et leur intégration dans un SIG 3D (Darwish 2006). Des travaux antérieurs comme ceux de (Koehl 2003, 2004) décrivent les méthodes d'acquisition photogrammétrique et les structures de données associées. Des recherches parallèles (Tarsha-Kurdi *et al.*) travaillent sur l'extraction automatique des lignes structurales des toits à partir de nuages de points LIDAR. Comme l'extraction de lots de données 3D nécessite des temps de traitement très longs, l'accélération du processus de restitution et de reconstruction des bâtiments en utilisant des algorithmes semi-automatiques et automatiques constitue une étape très importante.

Dans le cas de la reconstruction 3D de bâtiments, la photogrammétrie aérienne offre les meilleures conditions pour la restitution détaillée des toits. Mais dans le cas de toits complexes comme dans celui de bâtiments à l'architecture moderne les méthodes sont moins efficaces et pas très simples à utiliser. Le processus de reconstruction des toits doit être automatisé en ne tenant compte que des lignes structurales principales des toits.

## 2. METHODES 3D DES RECONSTRUCTION DES TOITS

Le manque de méthodes permettant la reconstruction automatique d'objets 3D montre bien que le problème n'est pas simple à résoudre. Même si (Kada *et al.* 2006) propose un certain nombre d'algorithmes pour la reconstruction automatique et pour l'acquisition semi-automatique de données, le problème principal restant est celui de la définition de structures de données 3D appropriées et de la saisie efficace de données. Dans le cas de bâtiments, les données les plus importantes à saisir sont les toits et les façades et l'on connaît leurs complexités dans le cas de nos villes modernes.

En général, deux approches sont proposées utilisant soit l'extrusion des traces au sol – ces méthodes d'extrusion existent directement dans *3D Analyst (ESRI)* et *ArcScene (ESRI)* – soit la reconstruction de « haut en bas » (Tse et Gold 2001). La meilleure méthode intégrée doit tenir compte de certaines caractéristiques comme le degré de détails (comportant des toits complexes ou simplement des toits rectangulaires), l'existence des sources de données (SIG

2D, images aériennes, nuages de points LIDAR) et enfin l'exploitation future envisagée du modèle.

Les toits de bâtiments sont de formes très diverses et variées. Ceci rend très difficile la mise en place d'une classification des types de toits. Mais une telle classification semble nécessaire pour pouvoir développer un processus de reconstruction standardisé.

L'extrusion de polygones est applicable quand les traces au sol (ou le contour extérieur) des bâtiments sont disponibles, comme cela est le cas sur les plans cadastraux par exemple, et que les hauteurs des bâtiments sont connues ou mesurées sans aucun autre détail des toits (Lammi 1997). Même si la résolution de ces modèles est très sommaire, les algorithmes de reconstruction sont dans ce cas très simples à mettre en œuvre et permettent une exécution très rapide. Dans le cas de *3D Analyst (ESRI)*, la hauteur peut être un attribut associé à chaque contour de bâtiment. La hauteur d'extrusion repose alors sur cet attribut et *ArcScene (ESRI)* permet une visualisation, et même une construction (après exportation) des objets 3D de manière très performante. Ces méthodes d'extrusion ont déjà été implémentées dans de nombreuses solutions commerciales et notamment dans des solutions SIG depuis une dizaine d'années (Pilouk *et al.* 1997). D'un autre côté, l'approche de « haut en bas » permettant de traiter des formes de toits beaucoup plus complexes sont également déjà en développement depuis une dizaine d'années (Brunn *et al.* 1996) et (Hendrickx *et al.* 1997). (Zlatanova *et al.* 1998) avait présenté des méthodes semi-automatiques pour la reconstruction de bâtiments 3D et d'autres objets complémentaires. Le processus de reconstruction des bâtiments 3D est basé sur la restitution numérique des lignes structurales des faces de toit à partir d'un modèle stéréoscopique, c'est-à-dire la mesure d'un nuage points (ou de lignes) correspondant au squelette du toit. La reconstruction du toit est ensuite effectuée en calculant automatiquement les façades des bâtiments à partir de ce nuage de points. Le modèle obtenu contient des murs verticaux sous forme de polygones plans orientés par l'intermédiaire de l'orientation du vecteur normal de chaque face du polygone.

Toutes ces méthodes présentent les mêmes caractéristiques suivantes :

- elles nécessitent la restitution de toutes les lignes caractéristiques des toits,
- elles utilisent des classifications de types de toits à partir de bibliothèques de formes de bâtiments,
- les processus sont semi-automatiques,
- certaines approches ne tiennent pas compte des informations descriptives des objets 3D,
- il subsiste des difficultés à générer des surfaces planes à partir des lignes 3D.

### 3. METHODES DE RECONSTRUCTION DE BATIMENTS 3D

Les processus de reconstruction des bâtiments 3D doivent être optimisés en évitant les difficultés relatives à la constitution d'une bibliothèque de types de toits. L'approche propose un processus de reconstruction entièrement automatisé n'utilisant que les lignes principales des toits : lignes de contour, lignes ou points de faîtage, lignes de rupture.

#### 3.1. Reconstruction des toits

Le processus de reconstruction ne s'occupe que de la géométrie. Les objectifs principaux de la reconstruction sont :

- la génération automatique des lignes de faîtage non restituées conformément à la géométrie des toits,

- la génération automatique de liaisons entre les lignes de faîtage et les lignes de contour des toits,
- la génération de polygones sous forme de facettes de toits plans à partir des lignes 3D existantes ou créées.

Cette approche utilise les algorithmes de triangulation basés sur les éléments principaux des toits comme décrits plus haut. Le processus reconstruit automatiquement les éléments manquants et « triangule » le toit. Mais la triangulation est effectuée sur tous les éléments de la même couche. Dans un SIG ou dans un fichier dessin structuré, tous les éléments de toit sont regroupés dans une même couche. Dans un tel cas, tous les toits sont calculés (triangulation) ensemble. Pour la segmentation de chaque toit il est alors nécessaire d'utiliser les polygones contours de chaque toit. Cette première méthode développée n'est pas suffisamment efficace dans le cas des espaces densément bâtis. En fait, dans le cas de toits voisins très proches, ce qui est très souvent le cas dans les zones fortement urbanisées, le processus de triangulation est dépendant de la distance entre les différents éléments. La triangulation de deux toits très proches générera des résultats indésirables [Figure 1a].

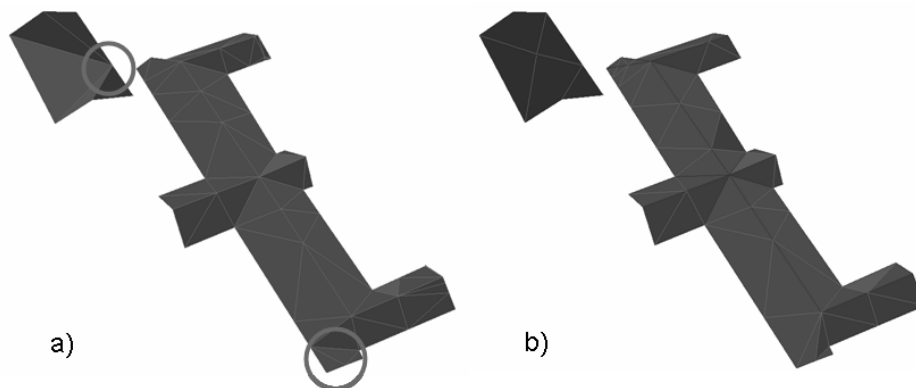


Fig. 1. a) TIN de toits dont les éléments sont regroupés dans une même couche : erreurs de triangulation dues à la proximité des toits voisins. b) TIN indépendants pour chaque toit : triangulation adéquate.

Pour procéder à une triangulation efficace de chaque toit de bâtiment, chaque ensemble d'éléments de toit doit être déplacé vers une couche indépendante. Deux filtres d'analyse spatiale sont utilisés pour effectuer cette opération de segmentation. L'environnement *Spatial Analyst (ESRI)* propose, par exemple, deux de ces filtres : il s'agit des filtres *spatial Rel. Touches* et *spatial Rel. Contains*. Ces filtres spatiaux incluent des critères spatiaux et sémantiques pour la restriction des entités à sélectionner en fonction de la localisation géographique ou de la description sémantique (attributs associés).

Le premier filtre est utilisé pour sélectionner la ligne de contour de chaque toit. Le second filtre est utilisé pour la sélection de tous les éléments contenus dans le polygone constitué par le contour du toit. Ainsi, chaque toit avec tous ses éléments constitutifs sont exportés vers une couche individuelle où il pourra être triangulé. Il en résulte une structure TIN pour chaque toit [Figure 1b].

Pour reconstruire automatiquement chaque toit, les éléments géométriques suivants sont nécessaires :

- couche contenant des polygones représentant les contours des toits,
- couche contenant les éléments nécessaires (point ou ligne de faîtage, lignes de rupture du toit),
- couche contenant l'enveloppe (zone de reconstruction).

La Figure 2 montre les éléments définis comme nécessaires décrits dans cette approche.

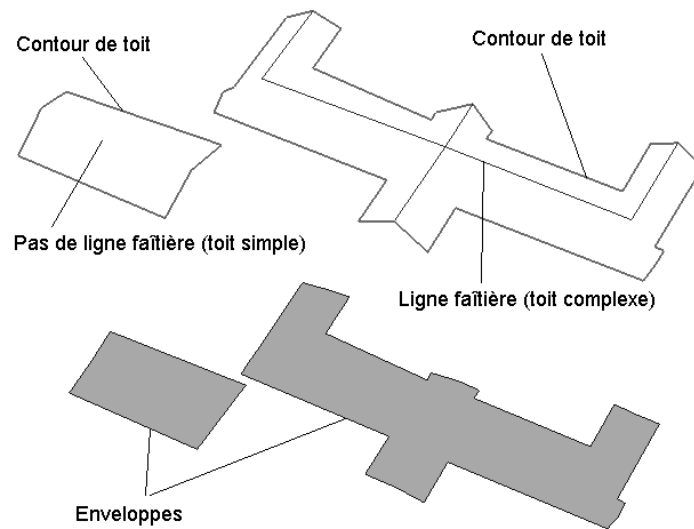


Fig. 2. Eléments nécessaires pour la reconstruction du toit : ligne de contour, lignes de faîtage, enveloppe.

L'enveloppe qui est définie pour la reconstruction permet la construction d'une structure de TIN décrivant indépendamment chaque toit. Une classe d'entité « 3D polygon » est générée à partir de la classe d'entité « polyline » du contour de toit. Le contour de toit est orienté à partir de ses différents arcs constitutifs. La méthode décrite dans (Bourke 1998) est utilisée pour réaliser une orientation correcte des différentes lignes du contour.

La Figure 3 montre le processus définitivement retenu pour la reconstruction des toits.

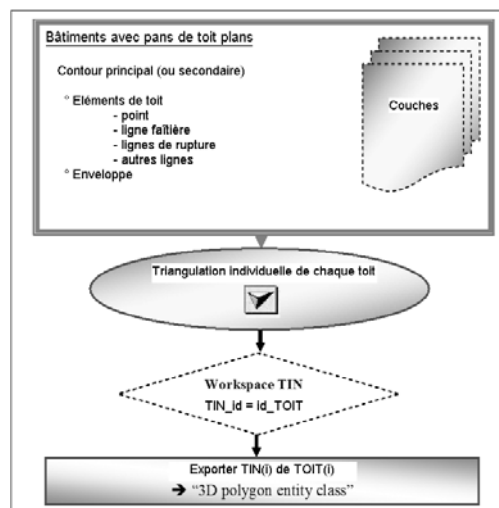


Fig. 3. Processus de reconstruction des toits

### *Avantages de la méthode proposée*

Les avantages de la méthode proposée pour la reconstruction des toits sont :

- reconstruction des toits indépendamment de la typologie des toits,
- une seule méthode pour tous les types de toits,

- construction automatique des éléments de toit manquants,
- processus de reconstruction efficace.

### *Inconvénients de la méthode proposée*

Les principaux inconvénients de la méthode proposée résident dans le fait que chaque toit est traité indépendamment ce qui requiert des temps de traitements relativement longs surtout dans le cas de gros lots de données. Dans certains cas de toits complexes le processus de triangulation basé sur des analyses de distances entre points du semis échoue dans le sens ou il n'est pas conforme aux résultats souhaités. Une reprise manuelle est alors nécessaire.

### **3.2. Reconstruction des murs**

L'étape suivante consiste en la reconstruction des murs de façade verticaux en utilisant une projection verticale sur une surface de référence. Cette surface de référence est classiquement un MNT dans le cas des façades principales. Il peut également s'agir d'un dessus de toit utilisé comme surface de référence pour les murs des étages supérieurs dans le cas de bâtiments à plusieurs niveaux.

#### *Modèles de reconstruction des murs de façade*

Dans le cas général, il est possible d'utiliser deux types de modèles topologiques pour la reconstruction de murs verticaux par projection.

Le premier modèle est un modèle de surfaces. Dans un modèle de surfaces, tous les murs sont représentés par des polygones indépendants constitués de quatre sommets. Les avantages de l'utilisation d'un tel modèle se résument par le fait que le contour de chaque toit peut être composé de segments linéaires différents et que l'altitude de chaque segment de base de chaque mur peut être différente. Dans ce cas, il n'est pas possible de créer une seule surface constituant la base du bâtiment.

Le deuxième type de modèle possible est un modèle de solides. Dans le cas d'un modèle de solides, chaque bâtiment peut être considéré comme une entité solide unique. Le contour du toit doit être une polyligne-3D fermée et orientée. Cette polyligne sera ensuite projetée sur le MNT. L'altitude de la face de base peut être définie à l'aide de paramètres, éventuellement en-dessous de l'altitude du MNT au même endroit. Ainsi, toutes les façades d'un même bâtiment auront la même altitude.

Les faces verticales sont construites à partir du contour du toit et de sa projection sur le MNT qui aura la même orientation. Chaque face est décrite par quatre points  $F_n (p_1, p_2, p_3, p_4)$ , orientée dans le sens des aiguilles d'une montre de manière à ce que chaque normale de face soit orientée vers l'extérieur du bâtiment comme décrit dans (Vermeij et Zlatanova 2001) [Figure 4].

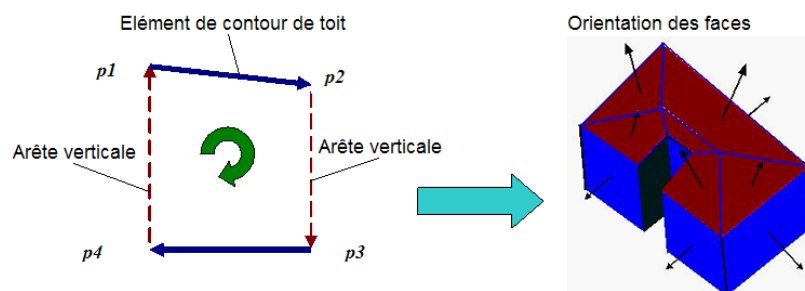


Fig. 4. Construction des murs

## Adjacence des murs

Le résultat d'une restitution de murs adjacents (de bâtiments différents ou d'un même bâtiment complexe comportant des parties en surplomb, par exemple) n'est pas toujours conforme à la réalité. Les géométries des murs adjacents ne coïncident que très rarement et de ce fait, certains espaces, débordements voire superpositions apparaissent entre des murs de bâtiments accolés. Ce genre de problème est difficile à résoudre, seul un test de cohérence géométrique dans la base de données et la mise en place de procédures incluant des conditions sur les distances entre les murs permettent de localiser ce genre de problèmes. [Figure 5]

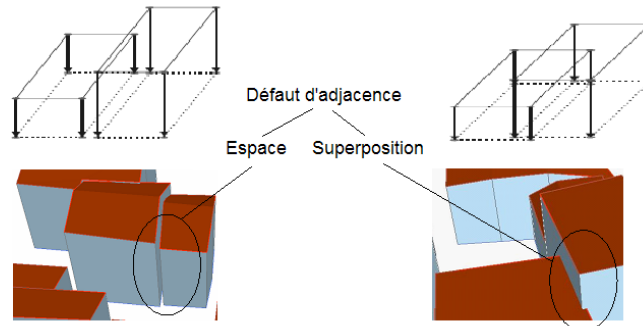


Fig. 5 : Murs adjacents

### 3.3. Structure de la base de données

La plupart des solutions de bases de données pour des bâtiments 3D proposent des structures à plusieurs tables dans un environnement relationnel. Chaque table est associée à un type d'entités spécifique. Une hiérarchie peut être construite en utilisant les associations basées sur les identifiants des entités. Dans ce cas, les tables reliées peuvent être rajoutées et des entités simples peuvent être agrégées en objets complexes. Dans notre projet, la Figure 6 montre comment il est possible d'établir des relations 'un à plusieurs' entre les tables d'attributs et les couches de murs. Cette table de murs est remplie automatiquement pendant la reconstruction des murs. Dans le même temps, une table concernant les bâtiments est créée et est également complétée automatiquement. Les tables descriptives associées peuvent être créées lors d'une étape antérieure et notamment directement lors de la restitution des toits par l'opérateur.

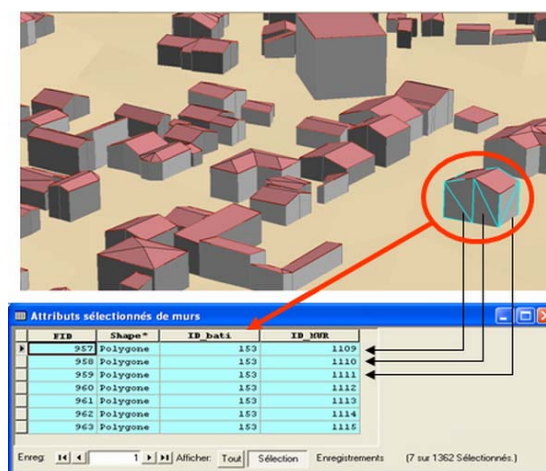


Fig. 6. : Structure de la base de données des bâtiments lors de la reconstruction des murs

### 3.4. Reconstruction des murs secondaires

Dans de nombreux cas, les toits des bâtiments sont plus complexes et comprennent des éléments additionnels. Les développements liés aux méthodes de reconstruction des murs décrits plus haut peuvent être appliqués de manière similaire au traitement de ces cas à la seule différence près que le contour des toits n'est pas projeté sur une partie de MNT, mais sur une autre partie de toit déjà reconstruite et jouant le rôle de surface de référence (d'altitude directement inférieure). La Figure 7 montre une illustration de ce type de murs secondaires dans le cas d'une reconstruction. Le cas particulier des cheminées ou d'autres éléments spécifiques des toits peut également être traité en utilisant les mêmes processus et en re-paramétrant les surfaces utilisées comme références. Suivant le même principe, des porches, couloirs, passages inférieurs peuvent être créés en utilisant comme surface de référence pour la projection la surface d'altitude immédiatement supérieure.

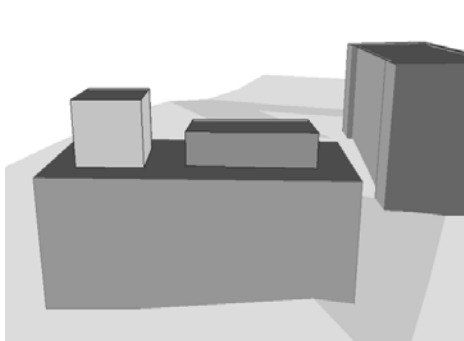


Fig. 7. : Construction des murs secondaires

### 3.5. Re-triangulation du MNT

La dernière étape de l'intégration du modèle de bâtiments dans une structure de SIG est la re-triangulation du MNT. Dans ce cas, l'ensemble des points utilisés pour la définition du premier MNT ( $TIN_1$ ) et les lignes résultant de la projection des contours de toits sont combinées pour une nouvelle triangulation formant un deuxième MNT ( $TIN_2$ ) comme cela est montré dans la Figure 8.

Lors de la même étape, la définition de l'altitude de la base de chaque bâtiment peut être fixée ou utilisée si elle avait déjà été redéfinie auparavant.

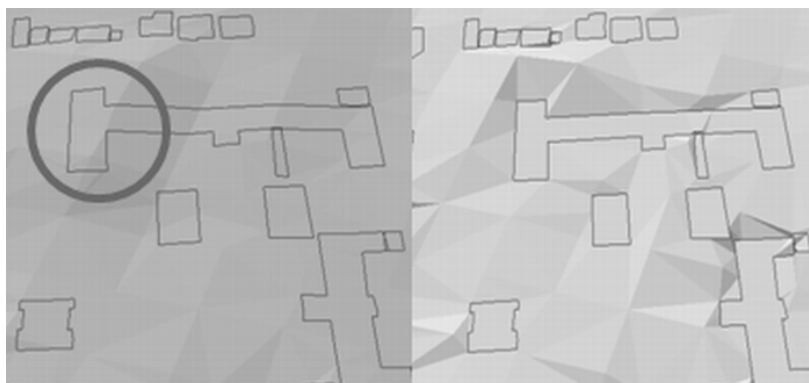


Fig. 8. Re-triangulation du MNT

## 4. CONCLUSION

L'espace urbain est un espace 3D dans lequel la troisième dimension est essentielle. Ainsi, l'intérêt dans la 3D s'est rapidement focalisé sur des possibilités liées à la visualisation des maquettes virtuelles en 3D. La gestion des bases et des lots de données dans les SIG avaient pour principal objectif la connaissance du niveau sémantique, donc descriptifs dans le cas, par exemple, des voies de communication routière, des bâtiments, des réseaux, de l'occupation des sols. Les modèles 3D urbains sont gérés et intégrés dans des SIG 3D, la précision et la qualité des SIG résultants sont alors directement dépendants de la qualité initiale des maquettes 3D.

Ce projet avait pour but de développer l'un des principaux aspects des SIG voués à la gestion des bâtiments 3D et notamment la reconstruction des bâtiments à partir d'images aériennes et leur intégration dans une structure de SIG 3D.

La phase de restitution n'est pas relatée dans cet article. Des fichiers de types DAO sont utilisés comme données de base lors du processus de reconstruction en trois étapes : reconstruction des toits, reconstruction des murs et plus tard texturation.

Le processus développé permet de reconstruire automatiquement les toits à partir des éléments structurés de manière très stricte et en utilisant des algorithmes de triangulation. Les murs sont ensuite reconstruits automatiquement. Enfin, les bâtiments sont enregistrés et structurés dans une base de données où des informations complémentaires peuvent être rajoutées pour en permettre une description plus fine.

Ce projet a été implémenté et testé sur une plate-forme *ESRI ArcScene 9.1* dans l'environnement VBA (Figure 9).

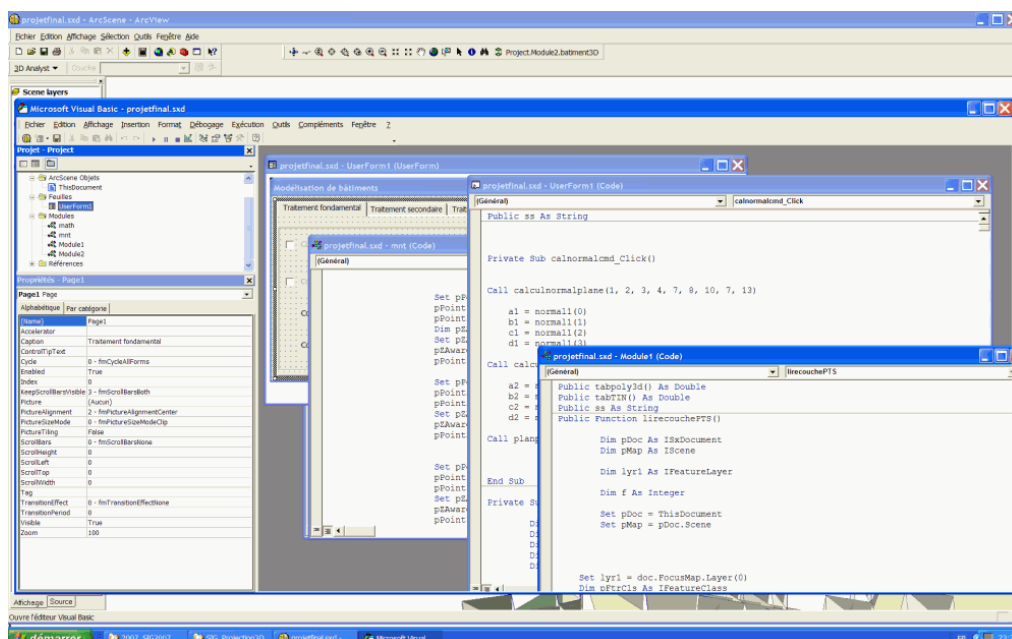
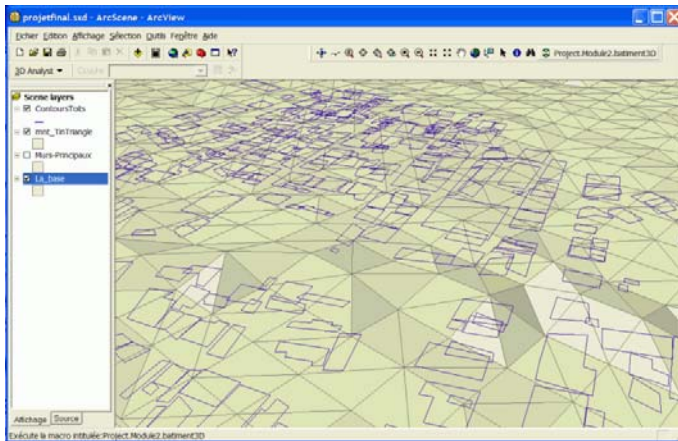


Fig. 9. Environnement de développement VBA sous ArcScene 9.1.

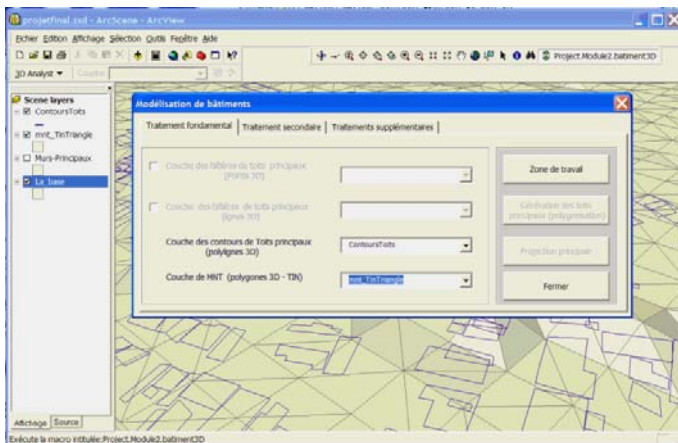
Les fichiers de données initiales ont été repris de plusieurs projets antérieurs. Les Figures 10 montrent les différentes interfaces et paramétrages mis en place dans ce projet.

Les développements futurs concerneront essentiellement des traitements spatiaux comme, par exemple, les problèmes d'incohérences rencontrés sur des bâtiments voisins.

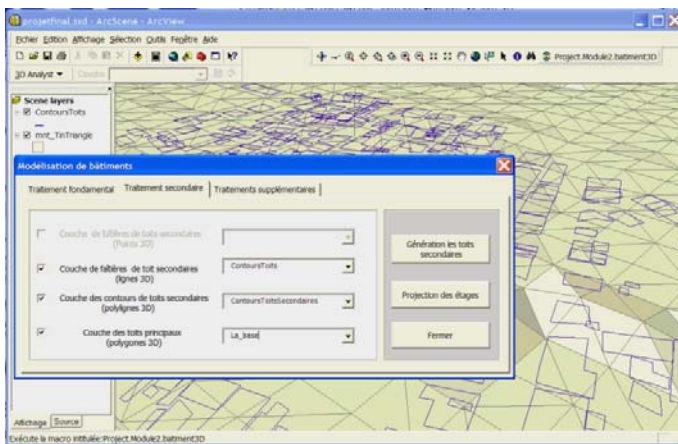
La structure de la base de données 3D peut être étendue du point de vue des aspects géométriques comme des aspects sémantiques. Ainsi, de nouvelles fonctionnalités d'analyses 3D peuvent être envisagées grâce à la gestion numérique des espaces urbains.



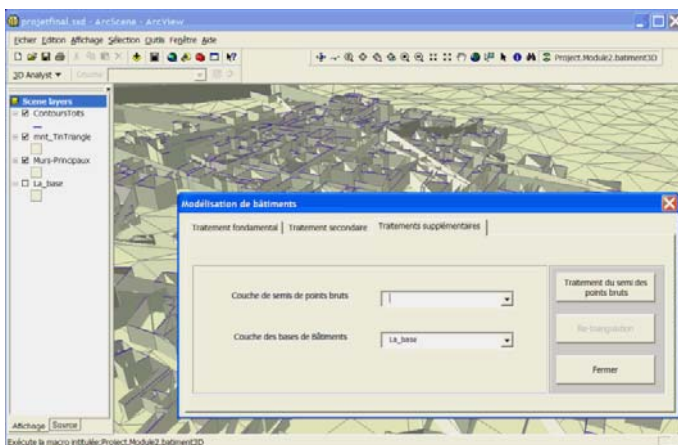
a) Module de bâtiments 3D et données de base.



b) Interface des traitements primaires



c) Interface des traitements secondaires



d) Interface des traitements complémentaires.

Fig. 10. Interface et paramétrage du module

## Références

- Bourke, 1998. <http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/geometry/>
- Brunn A., Gülch E., Lang F. and Förstner W., 1996. A multi-layer strategy for 3D building acquisition. In: Proceedings of the IAPR TC-7 Workshop, Graz, Austria, September 2-3 1996, pp. 11-37.
- Darwish O., 2006. Etude et définition d'un modèle pour la création et la gestion de maquettes numériques 3D en milieu urbain. In: Master II GER EUI, Université Louis Pasteur Strasbourg, 58 pages.
- Gruen A. and Wang X., 1998. A 3D city model data structure and its implementation in a relational database. In: Proceedings of the International Conference of Spatial Information Science and Technology, Wuhan China, 13-16 December 1998. pp. 429-436.
- Hendrickx M., Vandekerckhove J., Frere D., Moons T. and Gool L. V., 1997. 3D reconstruction of house roofs from multiple aerial images of urban areas. In: IAPRS, Vol. 32 Part 3-4W2, Stuttgart, September 17-19 1997, pp. 88-95.
- Kada M., Haala N., Becker S., 2006. Improving the realism of existing 3D city models. In: Abdul-Rahman A., Zlatanova S., Coors V. (Eds) Innovations in 3D Geo Information Systems, Springer Verlag, Heidelberg, pp. 405-415.
- Koehl M., 2003. Modèles et méthodologies de saisie pour maquettes numériques 3D. In: Revue de l'Association Française de Topographie ISSN 0290-9057, 4<sup>ème</sup> trimestre 2003, n°97, pp. 31-37.
- Koehl M., 2004. 3D city models, geometric data structure for 3D urban GIS. In: Proceedings of 24th Urban Data Management Symposium, 27-29 October 2004, Chioggia-Venice, Italy, 11 pp.
- Lammi J., 1997: Spatially Constrained Building Extraction Using Edge Finding and Model Fitting. In: IAPRS, Vol. 32 Part 3-4W2, Stuttgart, September 17-19 1997, pp.115-119.
- Pilouk M., Petrovic D., Grawford C. and Graf C., 1997. Development of the ArcView 3D Analyst Extension. In: IAPRS, Vol. 32 Part 3- 4W2, Stuttgart, September 17-19, pp. 196-202, 1997.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P., 2007. Joint combination of point cloud and DSM for 3D building reconstruction using airborne laser scanner data. Workshop of the ISPRS. 4th IEEE GRSS / WG III/2+5, VIII/1, VII/4 Joint Workshop on Remote Sensing & Data Fusion over Urban Areas and 6th International Symposium on Remote Sensing of Urban Areas, Paris, France 11-13 April 2007.
- Tse O.C., Gold C., 2001. Terrain, Dinosaurs and Cadastres – options for three dimension modelling. In: Lemmen C., Van Oosterom P. (Eds) International Workshop on 3D Cadastres, Delft, The Netherlands, pp. 243-257.
- Vermeij M. and Zlatanova S., 2001. Semi-automatic 3D building reconstruction using Softplotter. International Symposium on "Geodetic, Photogrammetric and Satellite Technologies – Development and Integrated Applications", Sofia, 08 - 09 November 2001.
- Zlatanova S., Pilouk M. and Tempfli K., 1998. 3D Object reconstruction from aerial stereo images. In: Proceeding of the 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization'98, Vol. III 9-13 February 1998, Plzen, Czech Republic, pp. 472-478.