

## **Reconstruction 3D et structuration sémantique d'édifices patrimoniaux**

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, notre approche se base sur une représentation tridimensionnelle de la morphologie de l'édifice basé sur le réel, c'est à dire sur l'acquisition et le traitement de données métriques de terrain. Il ne s'agit pas d'une prérogative absolue, mais il est facile de comprendre que cet aspect conditionne forcément le degré de précision en phase de référencement spatial des sources iconographiques et de segmentation. Pour donner un exemple, prenons le cas le plus simple, celui d'une photographie d'un édifice. Plus d'approximation existera entre le modèle 3D et l'édifice réel, moins précise sera la superposition entre la photo et le modèle et l'annotation sémantique résultante.

L'élaboration de la maquette 3D d'un édifice (tel que construit) passe par l'expression géométrique des objets qui le composent puis par la détermination de l'aspect de surface de ses différentes parties [De Luca L., 2006]. Deux phases d'élaboration interdépendantes sont nécessaires :

**L'acquisition des données spatiales.** Il s'agit du relevé de la morphologie, des dimensions et des aspects de surface de l'édifice étudié. Cette phase peut utiliser différents dispositifs basés sur le principe de mesure par scanner laser 3D, ou sur la photogrammétrie. Le résultat de cette phase consiste en un nuage de points qui peut présenter des caractères différents de morphologie du bâtiment par rapport de la fonction de la modalité d'acquisition employée.

**La reconstruction géométrique de la morphologie.** C'est l'étape de modélisation qui consiste à construire le modèle géométrique de l'édifice en s'appuyant sur les mesures issues de la phase de relevé. Plusieurs techniques permettent une reconstruction automatique, semi-automatique ou manuelle des surfaces à partir des nuages de points. Ces techniques diffèrent en fonction des données d'entrée qu'elles peuvent traiter et du type de représentation géométrique qu'elles peuvent générer.

### **5.1. Acquisition informations spatiales**

Cette phase du relevé peut utiliser des dispositifs d'acquisition directe (scanners laser 3D), qui restituent les points acquis sous forme de coordonnées dans l'espace 3D, ou des méthodes d'acquisition indirectes (photogrammétrie), qui se basent sur l'exploitation du support photographique pour extraire les coordonnées spatiales à l'aide de différentes techniques de restitution.

### 5.1.1. La photogrammétrie

« La photogrammétrie est la science ou la technique permettant d'obtenir des informations fiables sur l'espace naturel ou sur des objets physiques par l'enregistrement, la mesure et l'interprétation d'images photographiques .... » [American Society of Photogrammetry, 1980].

L'enregistrement photogrammétrique a utilisé pendant longtemps uniquement des chambres métriques et semi-métriques [Carbonnel M., 1968]. Aujourd'hui, des images numériques peuvent être acquises directement par une caméra à matrice DTC (en anglais CCD). Qu'elles soient employées en configuration mono ou stéréo, en photogrammétrie, les chambres appartiennent à trois catégories principales [Grussenmeyer P. et al., 2001] : chambres métriques, chambres semi-métriques, chambres à DTC.

Le principe fondamental sur lequel la mesure à partir des photographies se base est la déduction des paramètres d'orientation externes et internes de l'appareil photo [Kraus K. et al., 1997]. L'orientation interne consiste à fixer la position du centre de projection par rapport au support de l'image (pellicule ou capteur DTC) et à chiffrer la distorsion d'image. L'orientation externe détermine la position et l'orientation de la caméra dans l'espace. On détermine six paramètres, trois pour la position et trois pour l'orientation dans l'espace (voir détaillé en 6.1 et 6.2).

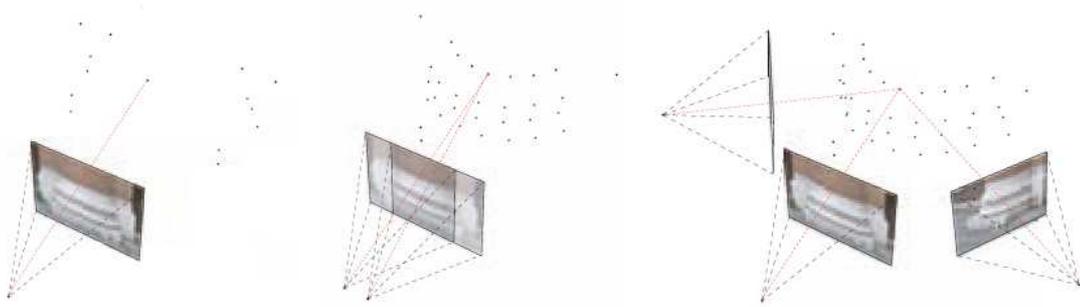
La restitution photogrammétrique permet d'extraire des images un ensemble de coordonnées exprimées dans l'espace. Ces méthodes diffèrent en fonction de la configuration de l'acquisition : mono, stéréo ou multi images [Grussenmeyer P. et al., 2001] (voir figure 32).

*Restitution à partir d'une seule image.* La restitution à partir d'images isolées de parties planes d'un objet s'appuie sur la mesure d'un certain nombre de points. Pour développer un redressement (ou une rectification), on considère, par approximation, que la surface est définie uniquement par des plans identifiés par un minimum de quatre points d'appui. L'homographie est l'équation projective qui établit la relation entre le plan de l'objet et le plan de l'image.

*Restitution à partir d'un couple d'images.* La restitution à partir d'un couple d'images utilise une configuration stéréo. En phase d'acquisition, les chambres (avec une orientation interne connue et étalonnée et une distorsion négligeable de l'objectif) sont presque parallèles entre elles. Dans les solutions de restitution numérique, l'observation stéréoscopique consiste en un système d'asservissement en temps réel qui agit sur l'un des clichés et qui prend en compte les paramètres d'orientation internes et externes des perspectives. Ce dispositif commande les déplacements en translation du deuxième cliché en fonction de la position observée sur le premier de façon à ce que les deux points observés soient toujours homologues. Ce mécanisme permet à l'opérateur de réaliser des représentations bidimensionnelles de façades, ou des modèles en trois dimensions

*Restitution à partir d'un bloc multi-image.* La restitution à partir d'un bloc multi-images peut utiliser des photographies convergentes, horizontales, verticales ou obliques. La restitution se base sur l'ajustement des blocs d'images par la méthode

des faisceaux (conditions de colinéarité) à partir d'un ensemble de correspondances (points, lignes) sélectionnées sur les photographies. Un des avantages principaux des méthodes basées sur ce principe est la possibilité d'exécuter un auto-étalonnage de la chambre directement à partir de photos de l'objet. En effet, une première solution de calibration déterminée, l'ajout de correspondances permet d'affiner le calcul des paramètres (externes et internes) par minimisation d'erreur. Cette approche n'est donc pas limitée à des chambres métriques ou étalonnées ce qui la rend beaucoup plus flexible.



**Figure 32** Schéma représentant les trois techniques de restitution photogrammétrique. De gauche à droite : la restitution à partir d'une seule image, d'un couple d'images et d'un bloc multi-image.

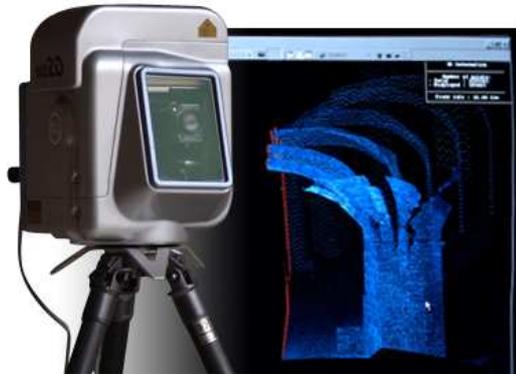
La restitution photogrammétrique à partir d'une seule image utilise des points d'appui préalablement mesurés qui sont nécessaires aux opérations de redressement. L'extraction de mesures supplémentaires est donc toujours contrainte à l'orientation du plan choisi pour la rectification. Cela rend cette technique une solution valable exclusivement pour la restitution des éléments sur un support bidimensionnel même s'il est possible (en exploitant une collection de points d'appui supplémentaire) d'assembler différentes restitutions bidimensionnelles dans l'espace pour restituer une composition tridimensionnelle.

Comme la restitution à partir d'une seule photo, la restitution d'un bloc d'images (dans les logiciels du marché) est une opération relativement manuelle (même si aujourd'hui des solutions automatiques commencent à se développer [Pierrot-Deseilligny M., 2007 ; Vu H. et al. 2009]) qui permet de déterminer la position d'un ensemble de coordonnées dans l'espace une fois sélectionnées par l'utilisateur sur les photos. Le choix de ces coordonnées est conditionné par la morphologie d'objet de la restitution. Il s'agit donc de sélectionner des informations pertinentes aux objectifs de la représentation (production d'un plan, ou d'un modèle 3D).

### 5.1.2. L'acquisition par scanner laser 3D

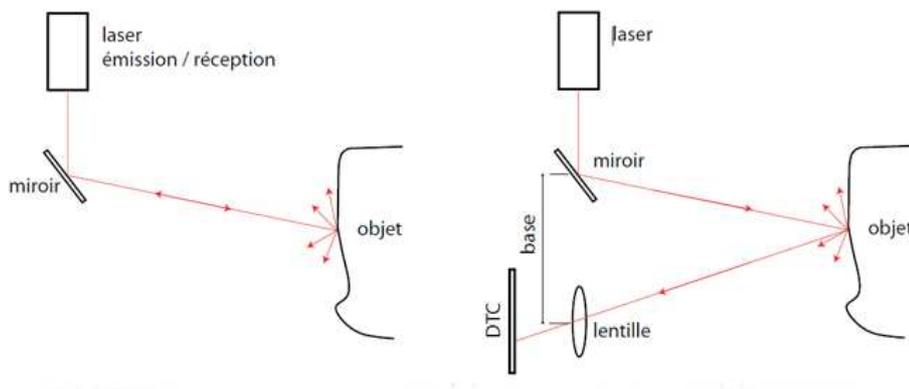
Le balayage laser terrestre est « l'utilisation d'un dispositif basé au sol, qui utilise un laser pour mesurer les coordonnées tridimensionnelles d'une région donnée de la surface d'un objet de façon automatique, dans un ordre systématique et à un taux élevé de vitesse, près du temps réel » [Boehler et al., 2002a]. Les modules de balayage laser permettent une acquisition directe de milliers de coordonnées par seconde. Au-delà des coordonnées spatiales (x,y,z), certains dispositifs de balayage

permettent aussi d'acquérir les valeurs d'intensité (niveaux de gris) et les valeurs colorimétriques (valeurs RVB) (voir figure 33).



**Figure 33** Un scanner laser « temps de vol » et résultat produit (nuage de point.)

Les modules de balayage laser 3D applicables au relevé d'édifices se divisent en deux catégories principales. Les scanners à longue portée mesurent des angles horizontaux et verticaux et mesurent la distance en calculant le temps de vol ou en comparant le changement de phase de l'onde transmise et reçue d'un signal modulé, et les scanners par triangulation incluent une base et calculent le point d'impact du faisceau laser en utilisant une ou deux caméras DTC (voir figure 34). Les deux principes sont différents soit en termes d'exactitude, soit en terme de portée. [Marbs A. et al., 2001] fournissent une description des principes de fonctionnement des scanners appartenant aux deux catégories.



**Figure 34** Illustration schématique des deux principes de fonctionnement des dispositifs de balayage laser 3D. À gauche le principe du temps de vol, à droite celui de la triangulation. [Marbs A. et al., 2001].

[Bohler W. et al., 2003] présentent une analyse comparative de la précision des scanner 3D. Dans la documentation du patrimoine architectural, un écart de quelques millimètres pour un seul point balayé n'est pas trop important si ce point fait partie d'un élément à géométrie régulière (plane, cylindrique ou analogues) et si le relevé sert juste à récupérer les paramètres qui décrivent cet élément dans une représentation bidimensionnelle. Par contre, si des surfaces irrégulières doivent être modélisées, les nuages de points bruités peuvent causer différents problèmes en phase de traitement.

Par conséquent, le procédé de balayage devrait être réalisé avec le dispositif le plus précis disponible pour la taille de l'objet à numériser et en fonction de la distance d'acquisition.

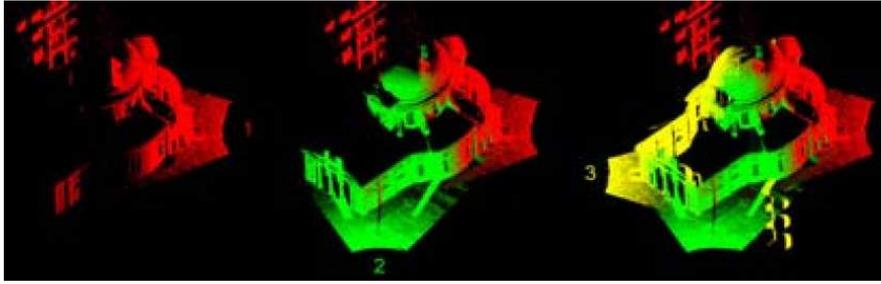
Les procédures de restitution peuvent produire les nuages de points trop denses, des disparités, des points non pertinents et des parties absentes sont souvent constatés dans les résultats. Des procédés du traitement des nuages sont alors nécessaires

Des traitements d'échantillonnage des nuages selon différents critères permettent de réduire la densité d'une zone du nuage (par critère spatial ou séquentiel) ou d'extraire des entités caractéristiques (analyse des discontinuités ou des valeurs d'intensités). On peut extraire aussi des informations pertinentes de façon semi-automatique ou manuelle.

Une simple acquisition (à partir d'un seul point de vue) n'est jamais suffisante pour enregistrer un ensemble patrimonial. Différentes acquisitions sont alors nécessaires, surtout quand le but est d'enregistrer un bâtiment entier, ou un site, à plusieurs niveaux de détail. Il est donc nécessaire de transformer les nuages de points collectés séparément dans un système de coordonnées unique. Trois stratégies sont possibles [Boehler W. et al., 2002b] :

- La collecte des données peut être accompagnée par une saisie de points d'appui au moyen d'un autre système de relevé (par exemple une station totale avec des coordonnées et une orientation connues) ;
- Des cibles (naturelles ou artificielles) peuvent être utilisées pour transformer les données acquises localement en fonction d'un système de coordonnées commun ;
- Des procédures automatiques de superposition de surfaces obtenues par maillage automatique (uniquement pour les objets de petite taille comme les sculptures ou les décors) peuvent être utilisées.

Pour les objets à l'échelle architecturale, la technique utilisée le plus fréquemment, est celle qui utilise des cibles. Ces points d'appui peuvent juste être des parties reconnaissables de l'objet (par exemple des coins) ou des cibles spéciales (sphères, cibles planes avec une réflectivité élevée) placées à des endroits judicieusement choisis. En ce qui concerne la première méthode, si la région acquise est assez grande, il y aura beaucoup de points disponibles pour assurer la robustesse géométrique de l'opération de consolidation. Malgré cela, il faut considérer que la propagation d'erreur peut être très importante quand il s'agit de considérer plus de deux stations. Dans la deuxième méthode, désormais supportée de façon complètement automatique, trois ou quatre cibles artificielles sont suffisantes pour obtenir une consolidation précise. Ces cibles pourront après être acquises aussi par des méthodes topographiques (théodolite, station totale) dans le cas d'un référencement local ou par des méthodes géodésiques (GPS - Global Positionning System) pour un référencement global.



**Figure 35** Consolidation d'un nuage de points issu d'un balayage laser 3D. Dans [De Luca L., 2006].

## 5.2. La reconstruction géométrique de la morphologie

Les procédures d'acquisition d'information ne prennent pas en compte habituellement les conditions géométriques de l'objet, il est donc nécessaire de transformer les nuages de points (aléatoirement) produits en structures polygonales ou en surfaces de haute qualité et sans perte d'informations importantes.

Aujourd'hui il y a plusieurs manières de créer un modèle 3D basé sur une architecture de monde réel. Par exemple un maillage automatique de nuage de point rassemblée par un outil de balayage laser ou modélisation photométrique créée des photos numériques ou de photo stéréo etc.

### 5.2.1. Reconstruction 3D à partir de nuage de points

Habituellement, les nuages de points ne sont pas suffisants comme résultat final de la documentation. Ils pourraient être considérés comme des moyens d'archiver la géométrie d'un objet en prévision d'exploitations futures. Dans ce but, beaucoup de techniques (automatiques, semi-automatiques et manuelles) existent aujourd'hui. Nous allons les présenter dans cette section en les regroupant en deux catégories principales :

*La reconstruction automatique de surface:* il s'agit de procédures d'interpolation ou d'instanciation automatique ou semi-automatique qui utilisent comme données d'entrée un nuage de points issu d'un balayage laser;

*La modélisation interactive:* il s'agit de techniques d'approximation manuelles qui décrivent les surfaces au travers de la manipulation d'un certain nombre de primitives géométriques et de fonctions de modélisation.

### 5.2.1.1. Les procédures de reconstruction automatiques

Le maillage polygonal est habituellement la méthode la plus adaptée pour représenter correctement les résultats des mesures, fournissant une description cohérente avec les données d'entrée. Beaucoup de méthodes ont été développées [Mencil R. et al., 1998] pour créer une représentation (triangulaire) régulière et continue de maille à partir d'un nuage de points (voir figure 36). Une fois la surface polygonale déterminée, diverses techniques de post-traitement peuvent être employées pour l'optimisation du résultat ; lissage, remplissage de trous, etc. La conversion des données mesurées en une surface polygonale cohérente est généralement basée sur quatre étapes:



**Figure 36** Un scanner laser 3D à triangulation optique et le résultat obtenu (maillage polygonal d'un élément sculpté).

**Prétraitement.** Dans le cas des données acquises par un module de balayage, cette étape est obligatoire afin de réduire le volume de données à traiter et donc le temps de calcul (cas d'une surface acquise à partir de points de vue multiples) et d'éliminer une certaine quantité d'erreurs produites par le module de balayage [Floater M. et al.1998]. Pour la réduction du bruit de mesure dans un nuage issu de balayage laser, des méthodes statistiques sont appliquées prenant en compte la courbure extérieure du nuage et essayant de préserver les points mesurés. Pour les nuages obtenus à partir d'une corrélation d'images, les correspondances fausses peuvent être enlevées automatiquement [Borghese A. et al., 2000] ou manuellement par une inspection visuelle.

**Détermination de la topologie globale de la surface de l'objet.** les relations de voisinage entre les parties adjacentes de la surface doivent être dérivées. Cette opération a besoin typiquement d'informations additionnelles (normales) pour la prise en compte de contraintes de discontinuité, dans le but de préserver principalement la définition des bords

**Maillage automatique.** Des mailles triangulaires sont créées répondant à certaines exigences de qualité. Une triangulation convertit l'ensemble des données d'entrée en modèle polygonal cohérent (maille). Cette opération divise les données d'entrée et produit des sommets, des arêtes et des faces (représentant la surface) qui

se relie entre elles sur les bords partagés. Des méthodes de calcul par éléments finis sont employées pour discrétiser le domaine d'entrée en la divisant en ensemble de petits éléments, typiquement des triangles ou des quadrilatères en deux dimensions ou des tétraèdres en trois dimensions. Une triangulation optimale est définie en mesurant les angles, la longueur des arêtes et la hauteur de l'aire des éléments où l'erreur de l'approximation par éléments finis est normalement reliée à l'angle minimal des éléments [Edelsbrunner H., 2001]. Les sommets de la triangulation peuvent être exactement les points d'entrée ou les points supplémentaires, appelés les points de Steiner, qui sont insérés pour créer une maille plus homogène. Le maillage polygonal peut être exécuté en 2D, 2D et demi ou en 3D, selon le type des données d'entrée [Remondino F., 2003].

**Post-traitement.** Une fois le modèle créé, des opérations d'édition sont généralement appliquées pour raffiner et perfectionner la surface polygonale résultante. Les polygones créés ont besoin habituellement de quelques améliorations pour corriger les imperfections ou les erreurs engendrées par les procédures de maillage automatique. Ces opérations (principalement manuelles) se basent sur la manipulation de simples triangles

- Correction de bords en présence de triangles divisés ou renversés ;
- Insertion de triangles en présence de trous.

Le modèle polygonal peut également être amélioré en ajoutant de nouveaux sommets et/ou en ajustant la position des sommets.

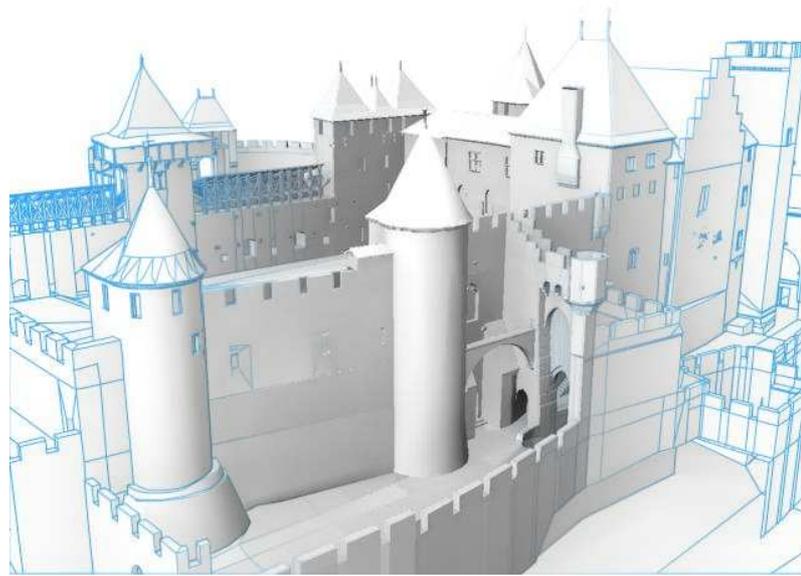
#### **5.2.1.2. La modélisation interactive**

Si l'objet balayé est composé d'un ensemble de primitives simples (tels que des plans, cylindres, cônes, sphères...) les primitives géométriques correspondantes peuvent être adaptées aux différentes parties du nuage de points. La reconstruction géométrique résultante sera par contre réduite à une représentation plus approximative. Les solutions commerciales disponibles pour le traitement du nuage de points diffèrent considérablement en ce qui concerne les outils qui exploitent cette technique.

D'autres solutions peuvent s'appliquer à la reconstruction de structures beaucoup plus compliquées. Des procédés manuels permettent enfin l'extraction de profils en utilisant des plans en intersection avec le nuage de points. Ces plans isolent les points compris dans une épaisseur (réglable) et offrent un support pour la reconstruction du profil décrit par des lignes ou des courbes.

Les fonctionnalités communes aux logiciels de CAO permettent aujourd'hui de manipuler ces lignes et courbes dans l'espace. À partir des courbes et/ou de simples coordonnées, plusieurs fonctionnalités ont été implémentées dans les logiciels de modélisation géométrique pour générer des surfaces. Certains d'entre eux permettent de manipuler des surfaces NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Les procédures seront décrites de façon générale indépendamment du type de génératrice utilisée (poly-ligne ou courbe) et du type de représentation géométrique résultante (filaire, par frontières ou paramétrique). La figure 37 montre une restitution tridimensionnelle

réalisée à partir d'un ensemble de points pertinents et conduite par des procédures de modélisation manuelles.



**Figure 37** Modèle 3D réalisé par des procédures de modélisation interactive. Château Comtal de Carcassonne.

### 5.2.2. Reconstruction 3D basée sur image

La photographie est un support bien adapté à l'interprétation des formes. Les approches et les techniques basées sur ce principe peuvent potentiellement éliminer la phase laborieuse normalement requise par la modélisation de structures géométriques détaillées. En effet, un des bénéfices majeur de ces techniques réside dans leurs capacités à restituer de manière fine les effets de textures et les détails liés aux imperfections des objets réels, qui sont très difficiles à obtenir à l'aide des techniques conventionnelles de synthèse d'image [Foley J. et al., 2000]. La solution offerte par ces systèmes consiste à remplacer les modèles conventionnels avec des représentations géométriques approximatives enrichies par l'image [Shum H.Y. et al., 2000]. En fonction de la quantité d'informations géométriques utilisées pour la reconstruction et du nombre d'images nécessaires pour la reconstruction.

Ces techniques basent la procédure de reconstruction 3D à partir d'un bloc d'images non calibrées et en deux phases:

Dans une première phase, on établit les correspondances entre différentes prises de vue. Ces correspondances peuvent être des points (ImageModeler, Photomodeler) ou des lignes présumées perpendiculaires ou parallèles [Cipolla R. et al., 1999] sélectionnées sur les images. Certains systèmes utilisent des techniques éprouvées de vision par ordinateur afin d'automatiser le plus possible cette tâche [Faugeras O., 1993]. De là, les matrices de projection des images peuvent être calculées à une transformation projective près grâce aux propriétés de la géométrie. Ces procédés permettent de déterminer les paramètres externes et internes des appareils photo (voir section 6.2).

La deuxième phase consiste en une véritable reconstruction des éléments de la scène en utilisant des primitives géométriques et des fonctions de déformation. Une solution commerciale exploite les propriétés des représentations par frontières (Brep) : les transformations simples (translation, rotation, changement d'échelle) peuvent alors être affectées à la primitive entière aussi bien qu'à une ou plusieurs de ses composantes (faces, arêtes, sommets). La figure 38 montre la restitution tridimensionnelle d'un édifice obtenue par une démarche de photo-modélisation.

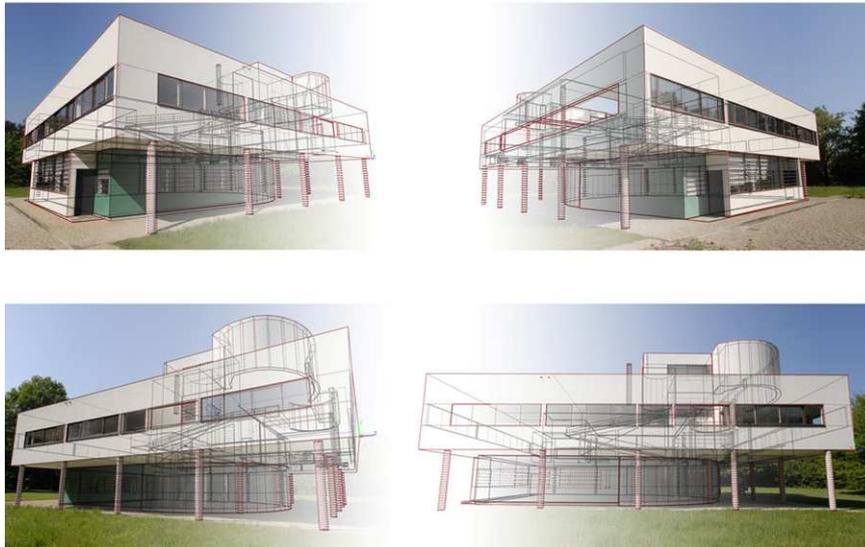


Figure 38 Exemples de modélisation à partir d'images.

### 5.3. Caractérisation sémantique du modèle 3D

La phase de relevé est juste le commencement du long processus qui caractérise la rédaction des documents montrant l'état actuel d'un édifice ou l'analyse des transformations qu'il a subies pendant son histoire. Différents traitements visent en effet, non seulement à collecter et à organiser les informations mais surtout à produire de la documentation pour différentes analyses spécifiques. Il apparaît donc essentiel d'étudier les conditions au travers desquelles des représentations produites à partir du relevé, pourraient être organisées autour d'un modèle de description de l'édifice. Cette problématique revient à considérer le modèle 3D comme moyen d'accès privilégié à l'information. Ceci impose, à partir d'une analyse sémantique de l'objet, d'isoler une structure d'entités dont les représentations peuvent être organisées en fonction de plusieurs points de vue.

La logique des décompositions sémantiques d'un édifice est toujours contrainte à la description de modèles théoriques. Ces approches sont en effet fondées sur la structuration de formes symboliques. L'objectif de cette partie de notre travail consiste à ajouter une couche sémantique à la description de la morphologie d'édifices existants. [Blaise J.Y., 2003] a montré que pour l'analyse architecturale, les approches de classification par intension (association d'un modèle théorique à un élément réel) sont incompatibles avec les exigences de l'étude du patrimoine construit, alors que des

approches par extension (extraction et groupage de descripteurs communs à plusieurs éléments) semblent plus pertinentes.

L'élément d'architecture, en tant que forme symbolique, appartient en effet principalement au domaine de la représentation mentale [Goulette J.P., 1999] : c'est un objet abstrait pour penser et concevoir un projet d'architecture. Le vocabulaire de l'architecte organise en effet le bâti selon une structure signifiante qui n'est pas seulement caractérisée par une apparence visuelle ou une nature géométrique. De plus, il faut remarquer que les connaissances qui interviennent dans un découpage sémantique de la morphologie d'un édifice sont toujours relatives à un objectif d'analyse.

### **5.3.1. Travaux relatifs**

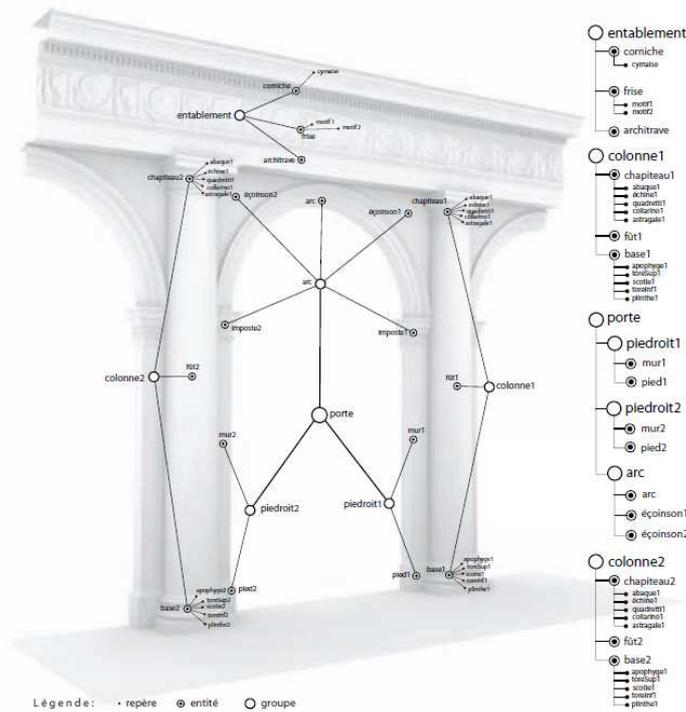
La sémantisation des représentations d'édifice suit la notion de grammaire des formes proposée par [Stiny G. et al., 1979] et [Stiny G., 1975].

Le premier exemple de la modélisation 3D basé sur une classification sémantique a été introduit par [Quintrand P. et al., 1985]. Les auteurs indiquent que : pour associer de la sémantique à la représentation d'une forme architecturale il est nécessaire de considérer le bâtiment comme une collection d'objets élémentaires.

Plusieurs recherches se sont concentrées sur le développement des classifications des éléments architecturaux dans les cadres théoriques [Tzonis A. et al., 1986] ou dans des applications de la modélisation géométrique [Gaiani M., 1999]. La modélisation sémantique a été également utilisée dans des applications de modélisation automatique de tissus urbains [EmGard K.L. et al., 2008] ou d'éléments architecturaux répétitifs [Mueller P. et al., 2006].

[Attene M. et al. 2007] ont développé ShapeAnnotator, un système modulaire pour caractériser d'un point de vue sémantique des représentations d'objets numérisés (sous forme de maillage polygonaux) au travers d'un processus d'annotation sémantique basé sur une ontologie. Pour la caractérisation sémantique, les auteurs utilisent des solutions de segmentation (automatiques et manuelles) des surfaces puis des comparaisons avec une base de données correspondantes.

Dans le domaine spécifique de l'architecture patrimoniale, la méthode définie par [De Luca L., 2006] permet d'associer des attributs sémantiques à un modèle de description conceptuel de la morphologie d'un édifice (représenté sous forme de graphe de relation) qui structure des multiples représentations des éléments architecturaux. Telle approche considère l'édifice comme un système de connaissances architecturales à partir duquel il est possible d'extraire un modèle sémantique qui permet, en fonction des points de vue spécifiques, de définir diverses représentations de la forme (voir figure 39).



**Figure 39** Graphe de description sémantique associé au modèle 3D [De Luca L., 2006]

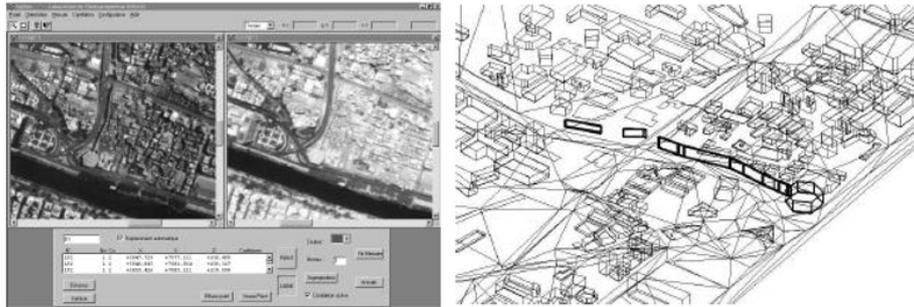
[Manferdini A.M. et al., 2008] proposent un système de classification sémantique pour l'étude de sites archéologiques. Le modèle géométrique est segmenté de façon semi-automatique et classées selon les règles archéologiques et architecturales. La classification sémantique des découvertes est ensuite lié à une base de données archéologiques (voir figure 40) indiquant entre autres la provenance parties qui composent les objets architecturaux (originales ou appartenant à d'autres éléments).



**Figure 40** Classification sémantique d'objets archéologiques. Dans [Manferdini A.M. et al.,2008]

A l'échelle urbaine, [Grussenmeyer, P. et al., 1999] proposent un principe dans lequel la structure sémantique associée à la géométrie est la base de la modélisation. L'espace est décomposé en différents concepts sémantiques, chaque concept comprenant une structure sémantique inhérente. Cette structure est basée sur

connaissances des règles de composition qui peuvent être programmées pour aider la reconstruction semi-automatique de différents objets géométriques. La restitution à partir de photos aériennes permet de procéder à la modélisation géométrique et sémantique des objets urbains, en incluant les parties visibles du monument vu de dessus. Ensuite, la photogrammétrie terrestre peut restituer les détails géométriques du monument en considérant ses aspects sémantiques (voir figure 41).



**Figure 41** L'interface d'un système pour la modélisation géométrique et sémantique d'objets urbains [Grussenmeyer, P. et al., 1999]

Du côté de l'annotation sémantique automatique de formes, la solution optimale pour annoter des modèles 3D serait d'utiliser un algorithme de segmentation forme capable de détecter automatiquement toutes les caractéristiques conceptualisées par une ontologie. Cette approche est loin d'être opérationnel pour l'instant. En effet, les algorithmes de segmentation existants se basent principalement sur des critères géométriques. Une analyse du problème de la segmentation de maillages polygonaux est fournie par [Shamir A., 2006], une comparaison des solutions existantes est traitée par [Attene M. et al., 2006].

### 5.3.2. Solution retenue

Comme on l'a vu dans la section 5.3.1 de ce chapitre, il existe aujourd'hui beaucoup de recherches qui traitent la problématique de l'annotation sémantique de représentations 3D. Notre travail se situe en continuité de l'approche développée par [De Luca L., 2006] qui définit un procédé complet pour obtenir des représentations tridimensionnelles structurées du point de vue sémantique à partir du relevé d'un édifice réel. Cette solution implique trois phases : premièrement la classification des composantes d'un édifice selon un point de vue (c'est à dire en fonction d'un vocabulaire, ou d'une analyse spécifique), deuxièmement la décomposition morphologique de l'édifice en composantes élémentaires et troisièmement la création d'associations entre concepts et les formes à l'aide des graphes de description.

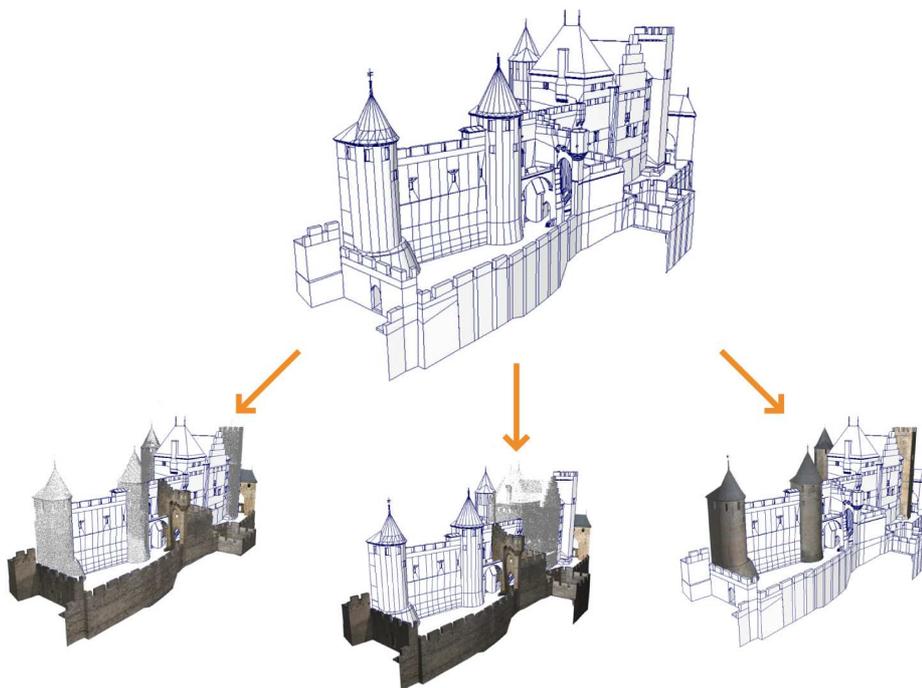
La notion de point de vue comprend trois aspects :

- L'utilisation d'un vocabulaire pour isoler des éléments ;
- L'identification d'une logique pour le regroupement de ces éléments dans un ensemble cohérent ;

- Le choix d'un type de représentation capable d'extraire de la forme les informations nécessaires à l'analyse.

En accord avec les principes introduits par [Falcidieno B. et al. 1998], un modèle de description (défini par sémantique et structure) est construit autour de la morphologie de l'édifice.

Une première phase du travail est dans le « niveau sémantique ». Elle consiste à isoler des concepts « termes de la description » et à lui associer des parties de la forme. La seconde phase « niveau structurel » permet d'établir un graphe de relations entre ces concepts pour organiser les éléments de la scène par rapport à une exigence de description. Le dernière « niveau de représentation » permet d'associer à chaque concept isolé une ou plusieurs représentations.



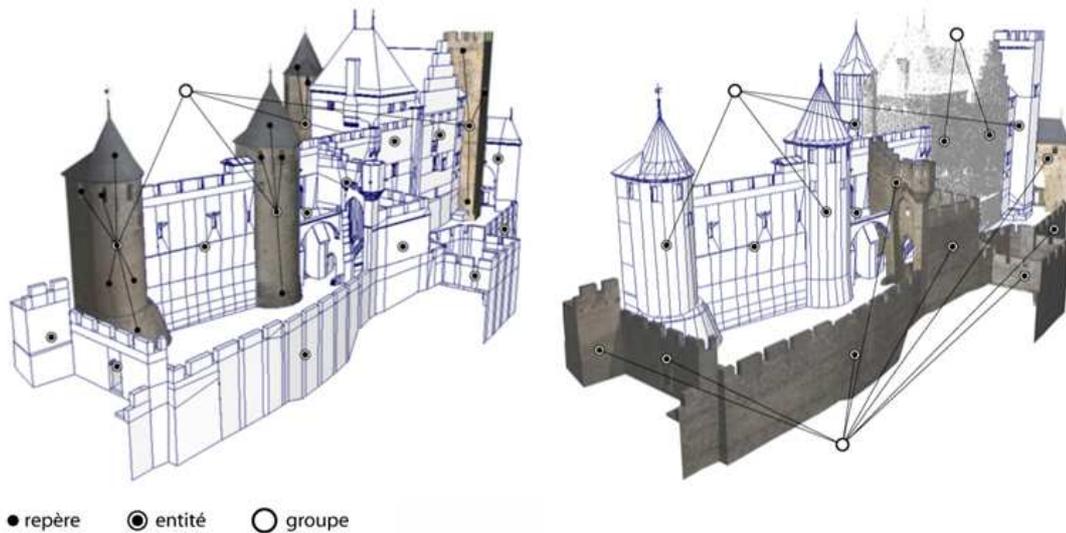
**Figure 42** Des multiples représentations du modèle 3D élaborées à partir du même modèle de description sémantique.

Cette méthode offre une liberté importante dans l'exploitation des données issues du relevé de l'édifice à partir du même modèle géométrique de la morphologie, on peut élaborer différentes descriptions sémantiques qui exploitent un système multi-représentations (voir figure 42).

Comme on le verra dans la suite, dans le cadre spécifique de notre travail de thèse, ce modèle de description de l'édifice n'est pas seulement utilisé pour la structuration de la maquette tridimensionnelle, mais il devient le dénominateur commun pour l'établissement de relations bilatérales entre les régions des images (sources iconographiques) et les annotations sémantiques associées (voir section 6.4).

Afin de constituer un cadre d'expérimentation à notre thèse, nous avons structuré le modèle tridimensionnel du château Comtal de Carcassonne (reconstruit à

partir d'une utilisation conjointe de balayage laser 3D et de photogrammétrie) selon l'approche de [De Luca L., 2006] en nous s'insérant dans le développement de la plateforme NUBES. Pour supporter la phase de description sémantique de la morphologie de l'édifice, on utilise une représentation symbolique, dans l'espace 3D, des relations (partie/ensemble) établies entre les éléments isolés. Il s'agit d'un graphe 3D (arborescence dans l'espace) dont la configuration dépend de la manipulation (relations hiérarchiques) d'un ensemble de termes dans une liste.



**Figure 43** Des exemples de structuration sémantique du modèle élaborés en organisant les éléments architecturaux en fonctions des concepts de « entité morphologique », « groupe finalisé » et « repère ».

Ce graphe est construit à l'aide de trois concepts : entité morphologique, groupe finalisé, repère (voir figure 43).

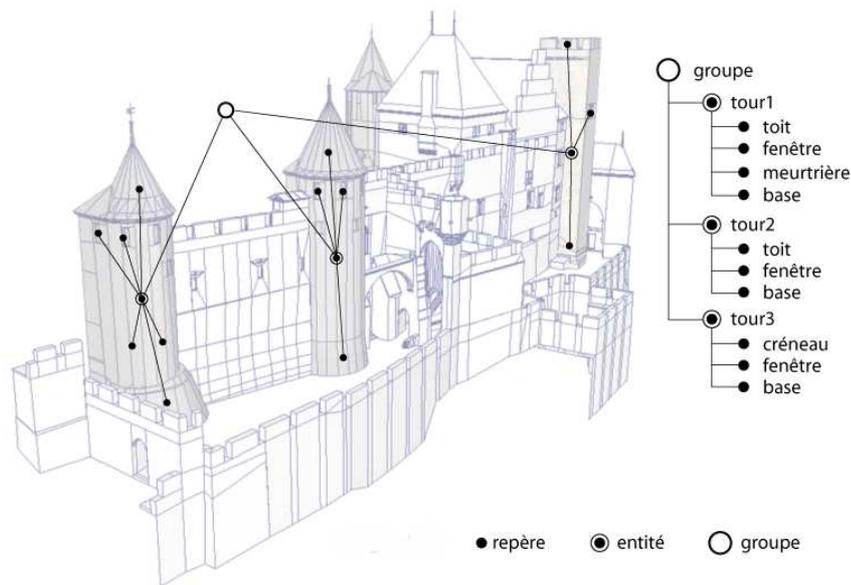
Une *entité morphologique*, qui résulte d'une décomposition morphologique, constitue un concept identifié par l'utilisateur pour la description de l'édifice qui peut être associé à une ou plusieurs représentations géométriques.

Un *groupe finalisé* est un nœud qui regroupe des entités morphologiques et qui n'a pas de représentation géométrique propre. Son extension spatiale résulte en effet de l'union des enveloppes englobant les entités qui lui appartiennent.

Un *repère* indique un aspect particulier à l'intérieur d'une entité. Par exemple une moulure d'un élément ou un aspect particulier sur la surface de l'entité (personnage historique d'un bas-relief, dégradation du matériau, etc.).

A partir de la structure du modèle 3D (décomposition morphologique) on produit une première description en associant à chaque concept isolé un nœud de type « entité morphologique » dans une liste de termes et en générant le symbole correspondant dans l'espace 3D. Ce symbole est situé au barycentre de l'enveloppe englobant l'entité. L'utilisateur peut alors organiser hiérarchiquement les entités sur la liste de termes (voir figure 44) en introduisant des nœuds de type « groupe finalisé » ou « repère ».

La création d'un groupe correspond à la création d'un concept qui réunit un ensemble d'entités : dans le graphe un symbole 3D est alors créé au barycentre de l'enveloppe englobant toutes les entités morphologiques sélectionnées. La création d'un repère est au contraire conduite manuellement en sélectionnant dans l'espace 3D un point sur la surface d'une entité morphologique. La correspondance établie entre un éditeur (liste de termes) et la manipulation des entités dans l'espace permet de conduire la structuration hiérarchique dans la scène 3D et/ou dans la liste d'entités. La représentation des relations dans l'espace est en effet calculée en temps réel par une procédure qui génère une chaîne de liaisons 3D en fonction de la lecture des niveaux hiérarchiques exprimés dans la liste des termes.



**Figure 44** Termes de descriptions associés à la morphologie de l'édifice organisés selon les relations hiérarchiques établies dans le graphe de description.

## **6. Référencement spatial et sémantisation de sources iconographiques**

Dans le chapitre précédent nous nous sommes intéressés à la reconstruction de la morphologie de l'édifice afin de produire une représentation tridimensionnelle enrichie du point de vue sémantique. Dans ce chapitre nous nous concentrerons sur les méthodes permettant de mettre en relation spatiale des sources iconographiques (sous forme d'images 2D) par rapport à la morphologie de l'édifice reconstruite. Comme on le verra dans le chapitre suivant, cette relation spatiale servira aussi pour transférer les attributs sémantiques associés au modèle 3D sur les images 2D. C'est le point central de notre approche : l'utilisation d'une description sémantique de l'édifice (voir section 5.3.2) comme dénominateur commun qui relie la représentation 3D des formes architecturales aux sources documentaires bidimensionnelles.

Ce chapitre se divise en deux parties principales : dans la première partie nous nous intéressons aux méthodes actuelles pour le référencement spatial d'images 2D sur des ensembles de coordonnées 3D, c'est à dire de superposition spatiale entre l'image et le modèle 3D. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous nous concentrons sur les modèles géométriques permettant d'exprimer les modèles géométriques des sources iconographiques dans l'espace 3D. Cette opération permet d'exprimer la position et l'orientation d'une image en fonction d'un référentiel, notamment celui du modèle 3D de l'édifice. Une analyse des différents modèles géométriques à utiliser ainsi que des différents niveaux d'approximation à prendre en compte (en fonction du type d'iconographie) permettra enfin d'identifier les méthodes les plus indiquées pour la spatialisation de différents types d'images (photos, vidéos, panoramiques, dessins, peintures, etc.).

### **6.1. Méthodes de référencement spatial**

Afin de s'intéresser à la structuration des bases de données de sources iconographiques en relation à la morphologie d'un édifice, notre travail aborde le problème de l'organisation spatiale de photographies sur une représentation tridimensionnelle de l'édifice issue d'un relevé (tel qu'un balayage laser 3D ou une restitution photogrammétrique). La notion de « résection spatiale » [Hartley R. et al., 2000] (orientation d'une image sur un ensemble de coordonnées 3D connues) appliquée au relevé d'édifice, peut constituer le point de départ pour le développement d'un système de référencement spatial de sources documentaires (photographies, images panoramiques, séquences vidéo, etc.) à l'intérieur d'une scène architecturale.

Le référencement spatial est une opération qui crée une relation spatiale entre l'image 2D et la représentation 3D qui correspond à une superposition. Il s'agit en

quelque sorte de retrouver les paramètres du point de vue de la source afin d'observer le modèle 3D à partir de ce point de vue. Ce point de vue peut être estimé de façon fine (c'est le cas d'une photographie, où la cohérence entre la réalité et l'image est forte) ou de façon approximative (c'est le cas des dessins, où la cohérence entre la réalité et l'image est faible).

Les méthodes de référencement spatial permettent d'obtenir différents types d'informations géométriques relatives aux images (position, orientation, paramètres optiques, etc.) et à différents niveaux de précision. Une fois analysées les travaux et les solutions existantes dans ce domaine, on s'intéressera à l'identification des plus adaptées à chaque type de source iconographique à prendre en compte en fonction de ses propriétés. Comme on le verra dans les chapitres suivants, le référencement spatial des sources iconographiques permet d'envisager des modalités d'interrogation des bases de données d'images en fonction de critères spatiaux (à différents niveaux de précision). Nous allons présenter ici un ensemble de méthodes de référencement spatial en les regroupant en trois catégories distinctes : méthodes manuelles, semi-automatiques et automatiques.

### 6.1.1. Méthodes manuelles

Le référencement manuel des photographies est certainement la solution la plus simple à mettre en place et la plus facile aussi du point de vue de l'utilisateur final. Dans le domaine de la documentation architecturale et archéologique différentes recherches vise aujourd'hui à créer une relation entre les sources 2D et une représentation de la morphologie d'un édifice au travers d'outils permettant d'indiquer de façon approximative la position de la prise de vue d'une photographie. D'habitudes, ces solutions utilisent des représentations cartographiques (les SIG par exemple) permettant d'indiquer sur le plan d'un édifice la position (et parfois la direction de vue) d'une photographie. La position et l'orientation du point de vue de l'image sont généralement présentées par un symbole graphique, comme un point ou une flèche.

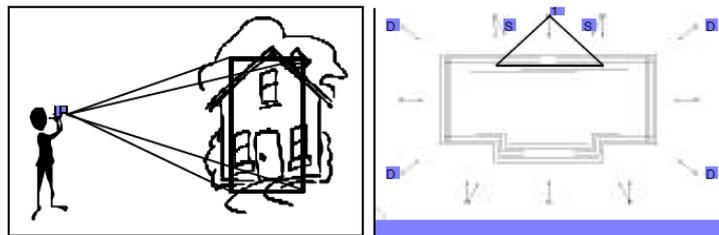


**Figure 45** L'interface du système de [Kadobayashi R. et al.,2003], capable à référencer manuellement les information 2D et 3D

[Kadobayashi R. et al.,2003] propose un système qui permet d'effectuer des recherches d'images sur la base des informations stockées dans les légendes des photos. En même temps, ce système permet de manipuler les nuages de points et/ou le modèle 3D résultat du relevé et crée par maillage automatique (voir figure 45). Des

cibles de référencement (placées sur différentes parties de l'édifice) sont utilisées comme points de référence pour retrouver des photographies corrélées ; leurs coordonnées sont obtenues par des mesures topographiques avec une station totale. Chaque image a son propre système de coordonnées basé sur la position du scanner au moment de l'acquisition des informations. Ces images sont orientées selon un système de coordonnées géographique. L'interface du système de consultation comporte une vue planimétrique, une élévation et une vue 3D. L'utilisateur peut rechercher des images dans la base de données en cliquant sur les positions relatives indiquées sur les plans de l'édifice ou sur le plan de masse mais aussi en indiquant des mots-clés.

Le système APIS (Architectural Photogrammetry Information System) [Waldhäusl P. et al., 1994] dont certains aspects ont déjà été présenté dans le chapitre 2 se base sur une base de données qui répertorie les bâtiments documentés par des acquisitions photogrammétriques. Le système est basé sur un outil permettant d'enregistrer des informations sur les édifices documentés et pour enregistrer les positions d'où les photographies ont été prises au moment du relevé photogrammétrique. Pour démarrer un projet avec ce système, les photographes doivent préparer leur propre esquisse sous forme de plans et élévations du bâtiment (comme indiqué dans la règle organisationnelle 3x3) pour ensuite y marquer les position et les direction de la caméra de façon approximative (voir figure 46).



**Figure 46** Planification des photographies du règle 3x3

Même si la méthode de référencement manuel des photographies est la méthode la plus simple et la plus compréhensible pour les utilisateurs du système, l'association d'images à leur point de vue nécessite une gestion manuelle de l'administrateur système. Les erreurs de détermination humaines sont toujours possibles, cela peut réduire la précision du système. De plus, c'est une méthode qui a besoin de beaucoup de temps de travail pour arriver à un niveau de précision suffisant pour qu'il soit utilisable dans notre méthodologie.

### **6.1.2. Méthodes semi-automatiques**

Les méthodes semi-automatiques de référencement spatial d'images se basent sur des solutions géométriques appelées de calibration et orientation des caméras. Ceci se réfère au processus d'utilisation des valeurs numériques pour établir des paramètres géométriques et optiques de la caméra virtuelle qui correspondent à un point de vue de l'image par rapport à un référentiel 3D (ensemble de points, modèle 3D, etc.) [Cipolla R. et al, 1999]. Les méthodes de calibration et orientation des caméras peuvent prendre en compte les paramètres intrinsèques (distance focale, distorsion,

etc.) et extrinsèques (translation et rotation) de l'appareil photo (ou plus génériquement de la camera) au moment de la prise de vue rapport à un repère tridimensionnel (voir figure 47). Plusieurs méthodes ont été développées.



**Figure 47** Calibration et orientation des caméras

La méthode DLT (Transformation linéaire directe) est une méthode rapportée par [AbdelAziz et al., 1971]. La méthode de DLT emploie un ensemble de points de commande dont les coordonnées d'espace-plan d'objet sont déjà connues. Les points de commande sont normalement fixés à un cadre rigide. Le problème principal de la méthode DLT est que les paramètres du calibrage ne sont pas mutuellement indépendants.

Parmi les recherches développées pour orienter une image sur un ensemble de coordonnées connues dans le domaine de la photogrammétrie [Hatze, 1988] et de la vision par ordinateur [Faugeras, 1993 ; Fitzgibbon et al., 1998 ; Heikkila et al., 1997 ; Kumar R. et al., 1994], une des méthodes les plus utilisées et celle proposée par [Tsai, 1986]. Son implémentation requiert des correspondances (points) sélectionnées respectivement dans l'espace 3D et sur l'image 2D. Cette méthode est basée sur un calcul en deux phases : premièrement on calcule la position et l'orientation, deuxièmement les paramètres internes de la caméra. Dans plusieurs applications qui nécessitent une bonne précision, on considère la caméra déjà calibrée. Cela veut dire que les paramètres internes sont déjà connus. Dans ce cas, seulement les six paramètres relatifs à la position et à l'orientation doivent être estimés.

### **6.1.3. Méthodes automatiques**

Nous pouvons référencer les images au modèle géométrique tridimensionnel par une technique automatique en deux façons. La première consiste à utiliser un outil pour enregistrer l'information spatial du point de vue d'image au moment qu'elle été prise (hardware). Une autre option est d'utiliser un algorithme de l'ordinateur (software)