

Approche de reconstruction 3D des états et outil associé

Les maquettes sont difficilement conçues depuis leur création pour supporter les évolutions dans le temps. Souvent il est nécessaire d'intégrer à la maquette originale les étapes historiques disparues des édifices ou d'apporter des modifications à la maquette reconstituée. La construction et structuration d'une maquette spatio-temporelle d'un édifice patrimonial et de ses états passés demande un double effort conceptuel : d'une part la maquette doit être construite et structurée dans l'espace en prenant en compte les échelles fondamentales de ses éléments architecturaux et de ses décors ; d'autre part tels éléments doivent obéir aux critères de décomposition temporelle. De ce fait, des liens entre éléments structurés doivent être établis afin de garder une trace des transformations qui se sont succédées. De plus, le seul état actuel peut être reconstruit rigoureusement grâce aux techniques mixtes de relevé laser et de photogrammétrie ; en revanche les états passés sont conditionnés par un certain nombre d'éléments disparus dont la morphologie et l'époque d'appartenance peuvent résulter incertaines. Dans ce sens, le processus d'interprétation augmente au fur et à mesure que les informations spatiales et métriques se réduisent. Par conséquent, la reconstruction tridimensionnelle se base dans un premier temps sur l'acquisition géométrique de quelques éléments subsistants ; dans une deuxième étapes elle se base sur l'interprétation des sources (parfois très imprécises d'un point de vue formel et graphique), et s'appuie sur les relations de composition qui peuvent être établies à partir des connaissances architecturales. Les sources historiques constituent une contrainte fondamentale comme leur nature détermine l'approche de modélisation 3D, sa qualité métrique et son niveau de fiabilité.

Ce chapitre est consacré à la description de la démarche de restitution des états historiques. Tout particulièrement, cette approche va de la prise en main d'une maquette à l'aboutissement de ses étapes temporelles. Nous présentons la méthode de décomposition sémantique exprimée en fonction du temps et nous définissons la nature des entités morphologiques temporelles et leurs possibles relations réciproques. Cette démarche méthodologique a donné lieu à une application développée dans le but de compléter et structurer la maquette spatio-temporelle afin de la prédisposer à représenter l'évolutivité au fil du temps (voir à ce propos l'Annexe D). L'intérêt de cet dispositif est de fournir un outil de modification, de vérification et de validation de la structuration temporelle (Figure 32).

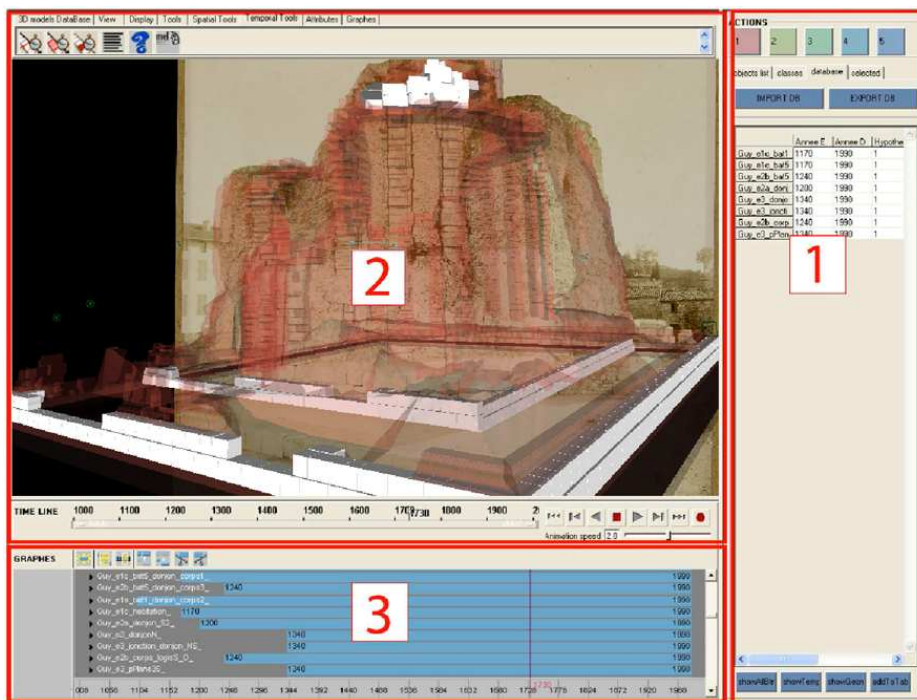


Figure 32. Environnement de travail qui permet : 1) la gestion des transformations pour chaque entité ; 2) modélisation à partir d'images et manipulation de la maquette à travers une barre temporelle ; 3) visualisation du cycle de vie des entités par le biais de diagrammes d'états.

5.1. Reconstruction 3D des états

Cette étape de notre démarche se base sur la restitution d'un état quelconque de l'édifice (actuel ou passé). Nous soulignons deux aspects fondamentaux : premièrement, dans cette approche, diverses techniques de restitution 3D peuvent être exploitées, à condition que le résultat soit une maquette structurée en fonction d'un point de vue. Deuxièmement, nous n'avons pas forcément besoin de commencer avec la restitution de l'état actuel, qui constitue seulement un des états représentant le cycle de vie d'un bâtiment. En effets, cet état ne peut pas toujours être restitué, car si les édifices ont disparus, aucune acquisition de données sur le terrain n'est possible. Dans le cas où des éléments sont subsistants, la restitution de l'état actuel peut constituer le point de départ pour la reconstruction géométrique. Dans ce dernier cas, la modélisation géométrique de l'état actuel peut se baser sur une acquisition photographique, laser, ou hybride (qui consiste dans l'association des premières deux techniques). A titre d'exemple, une acquisition hybride de l'état actuel est possible à travers l'outil Nubes Forma, qui permet de :

- extraire des nuages de points les profils pertinents pour la reconstruction géométrique ;
- restituer la morphologie de l'édifice à travers trois techniques en fonction de l'objet de restitution : les profils pertinents de points précédemment extraits, les primitives architecturales et un maillage automatique à partir de points du nuage ;

- importer les photos de l'état actuel dans la même interface de modélisation et les calibrer à travers la corrélation entre les coordonnées 3D de la volumétrie restituée et les mêmes points 2D identifiés sur les photos.

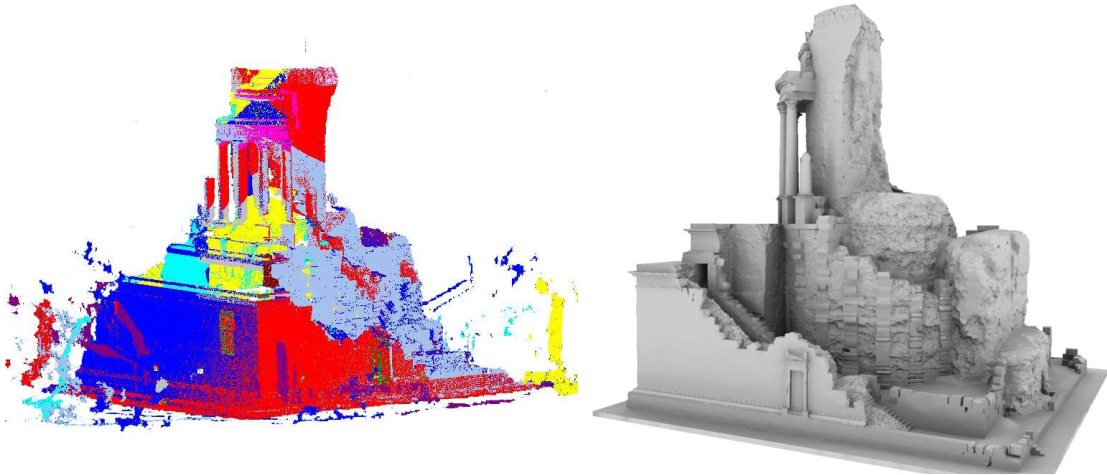


Figure 33. Etat actuel de Trophée des Alpes : à gauche, nuage de points du site ; à droite, modèle 3D élaboré à partir d'une approche hybride basée sur l'acquisition laser et des techniques de photogrammétrie.

Le modèle ainsi restitué constitue la base pour les opérations suivantes de reconstruction des étapes historiques. Afin de restituer les étapes passés, il s'agit premièrement d'isoler chaque état sur la base des connaissances variées telles que les sources iconographiques et l'interprétation des experts. Cette démarche, décrite dans les sections suivantes et dans (De Luca et al. 2010), est basée sur trois opérations complémentaires :

- Référencement spatial des sources en s'appuyant sur l'état précédemment restitué ;
- Modélisation de chaque état historique en s'appuyant sur les sources iconographiques ;
- Eventuel enrichissement de la géométrie à travers l'extraction de textures et la projection à partir des images.

5.1.1. Référencement spatial des sources

Notre démarche se base sur l'importation et le référencement d'images dans la scène 3D. Le référencement spatial permet d'établir un lien entre les sources et les éléments déjà restitués. La détection de peu d'éléments en commun entre la maquette et les sources permettra ensuite de modéliser la géométrie par comparaison. Le référencement d'images varie en fonction de la typologie des sources. Le cas du Trophée des Alpes (Figure 34) est emblématique car les évolutions de ce site peuvent être connues grâce à des photos historiques des premières décennies du XXe siècle et à des dessins plus datés à l'époque de la transformation en forteresse. Un dessin des Formigé suppose la forme originale du monument augustéen.



Figure 34. Sources documentaires iconographiques concernant le Trophée des Alpes et relatives à différentes époques. De gauche à droite : dessin hypothétique du monument dans sa forme originelle ; transformation du monument en forteresse au cours du Ve siècle ; vestiges du monument au début du XXe siècle ; photographie du monument entre 1910 et 1933 ; photos historiques et actuelles du monument.

Nous proposons les trois méthodes suivantes de référencement en fonction des sources iconographiques.

Photos historiques. Cette approche détaille le référencement spatial dans le cas de photos historiques. Avec ce typologie de sources, la technique adoptée est celle de la résection spatiale. Les images sont calibrées (orientées dans l'espace) en exploitant les éléments déjà restitués d'un autre état. Il s'agit de définir les relations projectives entre les photos et l'état restitué. La procédure de résection spatiale permet d'établir un ensemble de correspondances entre chaque photo (coordonnées 2D) et la restitution 3D de l'état (coordonnées 3D). A partir de ces correspondances, il est possible de définir le modèle géométrique de la camera associé à chaque photo, qui est défini par les paramètres intrinsèques (longueur focale et distorsion) et extrinsèques (vecteur de translation et de rotation) du modèle géométrique de l'image. La résection spatiale de la camera pose deux problèmes. Premièrement, dans le cas de photos historiques, les informations au moment de l'acquisition photographique sont souvent inconnues (longueur focale et distorsion) et le format de l'image peut être modifié. Dans ce cas, l'estimation des paramètres intrinsèques devient une tâche difficile. Deuxièmement, souvent l'état actuel restitué et celui décrit par la photo historique sont très différents et cette disparité peut empêcher la détection de coordonnées 2D et 3D. La seule solution est celle de limiter la correspondance de coordonnées aux seules parties qui n'ont pas été modifiées au fil du temps. Cet aspect est très contraignant, et parfois les éléments subsistants sont en nombre très réduit. Le calcul de résection spatiale est fait à travers l'algorithme de calibration d'images de Tsai (Tsai 1986), qui a été intégré dans Nubes Forma. Cette procédure nécessite 11 correspondances 2D/3D pour définir les caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de la camera. Afin d'obtenir une calibration précise des photos, il est important que les points caractéristiques soient choisis de façon soignée, en faisant attention à deux aspects :

- Les correspondances 2D/3D doivent être distribuées de façon homogène sur toute l'extension maximale de l'image ;
- Les mêmes correspondances 2D/3D doivent être sélectionnées de façon homogène sur toute la profondeur de la scène 3D.

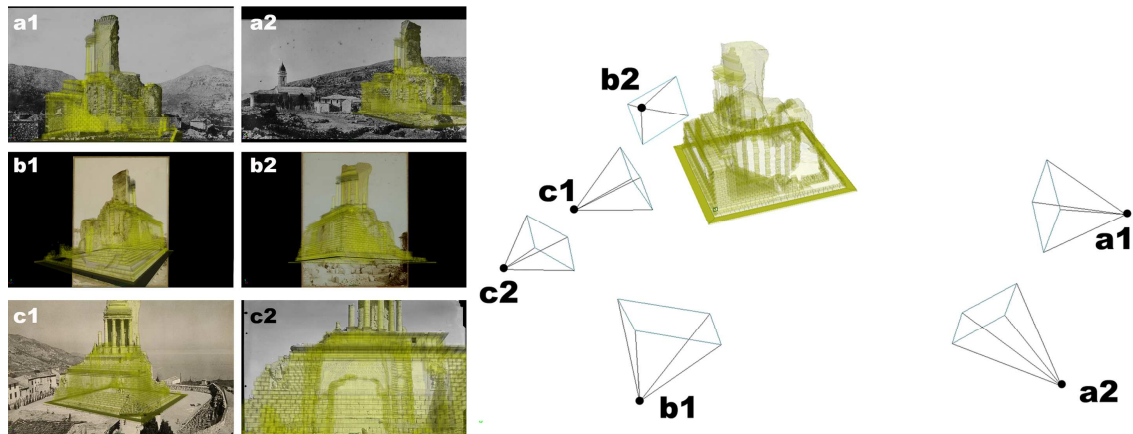


Figure 35. Référencement spatial des photos historiques du Trophée des Alpes sur le modèle 3D de l'état actuel de l'édifice.

La valeur moyenne des erreurs de re-projection peut varier significativement en fonction de la qualité de la photo. En effet, si la dimension en pixels est réduite, l'erreur en pixel sera très importante et la photo ne sera pas bien calibrée et donc positionnée dans la scène 3D. Cette approche pourrait être étendue afin d'intégrer le référencement spatial de dessins ou peintures en perspective.

Dessins techniques (relevés manuels, vues de faces, coupes, etc.) et photos redressées. Ce genre d'iconographie utilise les règles des projections orthogonales ; les images sont référencées manuellement à travers l'importation dans la scène à une échelle appropriée (Figure 36). Cette phase s'opère donc en quatre étapes :

- Définition de l'orientation du plan de projection orthogonale de l'image à travers 3 coordonnées 3D appartenant à la surface estimée parallèle aux faces de la volumétrie qui sont décrites par l'image ;
- Importation de l'image dans la scène sur le plan de projection ;
- Mise à l'échelle de la projection orthogonale à travers la correspondance entre deux coordonnées 2D et deux coordonnées 3D ;
- Déplacement de l'image en direction orthogonale au plan d'importation afin de restituer les diverses entités visibles dans l'image.

La restitution 3D est effectuée à partir du remaniement des volumes par projection de l'image. Cette démarche a deux limites. Premièrement, la mise à l'échelle se base sur deux seules correspondances 2D/3D : il est donc conseillé de choisir des correspondances appropriées, distribuées sur une portion étendue de l'image. Ce genre de dessins étant basé sur l'assemblage de photos (mosaïque de photos) ou sur un relevé manuel (dessins techniques), des marges d'erreurs (plus ou moins importantes) conditionnent le positionnement de l'image et sa mise à l'échelle. Par conséquent, des discordances métriques entre la représentation bidimensionnelle et l'état actuel déjà restitué pourraient se présenter.

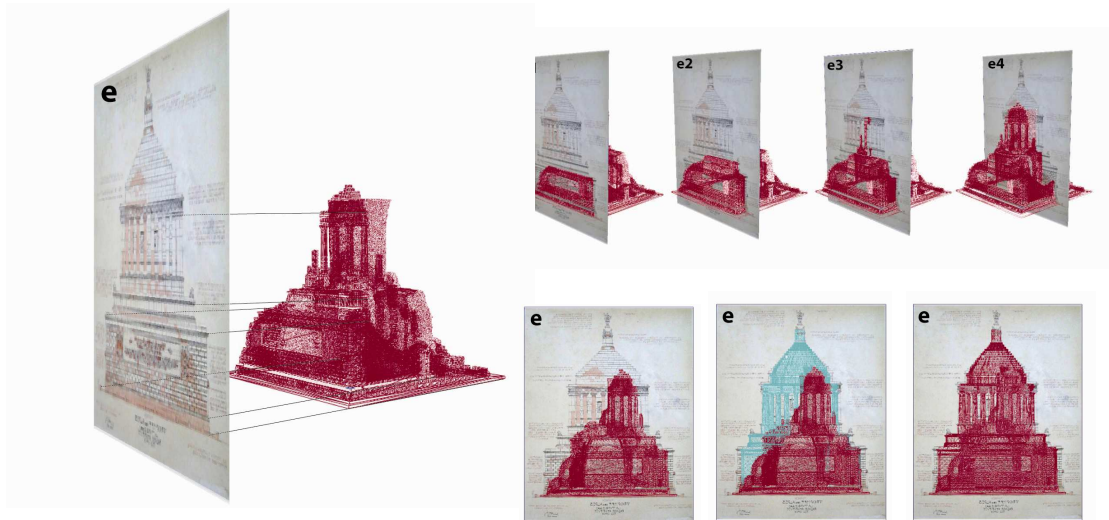


Figure 36. Insertion d'images en projection orthogonale dans la scène 3D.

Dessins en pseudo perspective et pseudo axonométrie. Ce genre de dessins n'est pas codé : ils ne sont pas définis à partir de règles projectives coniques ou cylindriques. Généralement à cette catégorie appartiennent esquisses et croquis, icônes, pseudo perspectives et parfois gravures. Dans ce cas, l'image ne peut pas être référencée par rapport à toute la scène. Il s'agit alors de référencer manuellement l'image par rapport à l'élément plus significatif de la scène qui a déjà été modélisé, selon une des techniques précédentes. Cette étape se base sur :

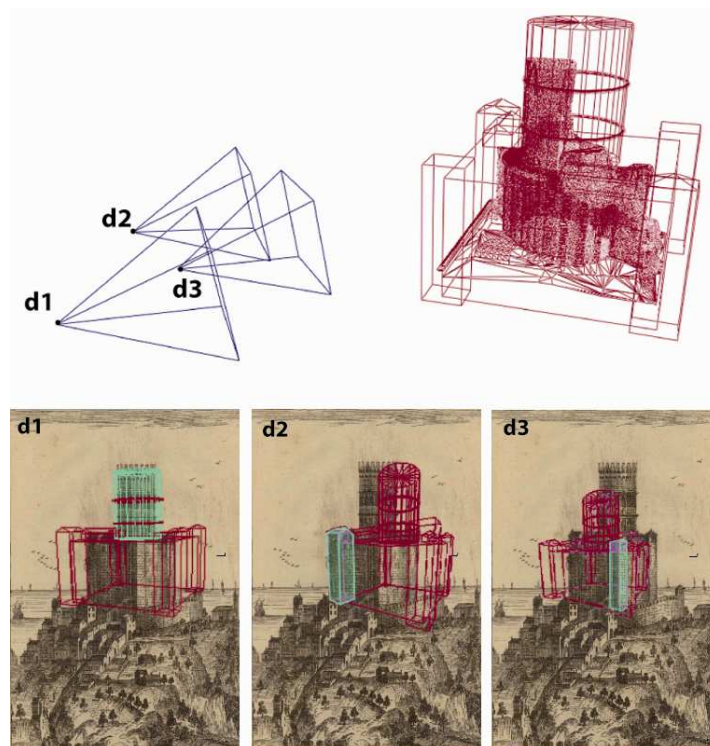


Figure 37. Référencement spatial de pseudo perspectives en fonction de divers objets de la scène représentée.

- Le référencement spatial manuel de l'image en fonction de l'élément plus significatif de la scène ;
- L'ajustement de l'image par rapport à la scène 3D (le déplacement manuel de la source et/ou la mise à l'échelle de l'image et/ou le réglage de la profondeur du plan d'image en fonction d'autres objets de la scène).

Ce genre d'images posent un problème important : le remaniement des volumétries sera effectué de façon sommaire en s'appuyant sur l'image qui peut éventuellement être déplacée dans la scène afin de restituer les éléments qui ne sont pas à la bonne échelle. Les proportions entre les objets de la scène sont déduites à partir des éléments subsistants. Le niveau de fiabilité géométrique de ces restitutions est donc très limité.

5.1.2. Modélisation géométrique 3D de chaque état

La construction d'un modèle géométrique des états passés à partir des sources historiques se base sur deux méthodes opposées : si l'état a disparu et aucun élément de tel état apparaît dans d'autres états précédents ou suivants, la modélisation 3D est effectuée à partir des seules sources iconographiques le décrivant. Si au contraire d'autres états sont connus, la modélisation 3D se base sur la comparaison de deux états : la projection perspective (2D) de l'état passé et la représentation 3D (de l'état modélisé).

Cette approche exploite les avantages de la photomodélisation : cette technique utilise les principes de géométrie projective afin de restituer les formes 3D. L'état restitué et la photo historique calibrée fournissent le support de restitution : l'environnement de travail permet de récupérer la position des points caractéristiques sur lesquels il est possible de s'appuyer afin de restituer les nouvelles entités. Toutefois, la restitution à partir de sources historiques ouvre des problèmes d'acquisition d'information. En effet, souvent les sources historiques ne donnent pas un aperçu complet de l'artefact. Au contraire, d'une part les sources offrent des informations partielles et incomplètes ; d'autre part parfois il subsiste une incohérence géométrique entre deux états. Par conséquent, diverses solutions de modélisation, basées sur le principe d'intersection, sont possibles :

- Intersection de deux lignes de projection correspondant aux points homologues sélectionnés sur deux images. De telles images doivent concerner la même époque temporelle.
- Intersection entre la ligne de projection d'un point sélectionné sur une image et un axe du système cartésien de référence de la scène 3D.
- Intersection entre la ligne de projection d'un point sélectionné sur une image et un plan de référence précédemment défini dans la scène 3D.

De ce fait, afin de déterminer la position des entités géométriques, de les manipuler et de les déformer, nous utilisons les points caractéristiques extraits à partir des formes 3D. Par la suite, les techniques de modélisation exploitées concernent par

exemple la création et l'ajustement de primitives, l'extrusion de faces ou la création de mesh. Enfin, quand l'information géométrique est absente ou incertaine à cause des occlusions (dans les photos par exemple), les propriétés des formes architecturales telles que la condition de parallélisme, orthogonalité et symétrie sont exploitées.

5.1.3. Restitution de l'apparence visuelle

Les restitutions historiques peuvent être valorisées à travers l'extraction et application de textures à partir d'images. Ce processus est validé par la cohérence géométrique entre la maquette 3D et la position spatiale des images. En fonction des sources iconographiques adoptées, divers types de projections sont possibles.

Projection perspective. Si l'extraction de textures est effectuée à partir de photos ou peintures en perspective, on peut projeter le plan d'image de la camera sur le modèle 3D et isoler la portion d'image qui correspond à la géométrie reconstituée qui doit être texturée. La géométrie peut être enrichie par des textures plaquées sur les surfaces à partir d'une image ou plusieurs images. Les sources documentaires étant en nombre réduit, le cas plus fréquent est celui de texturer les états passés à partir d'une seule image.

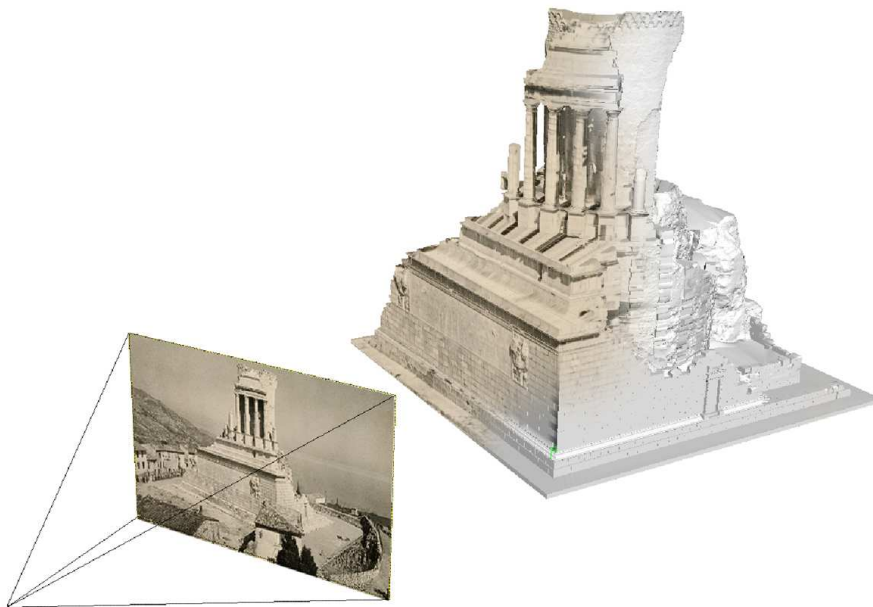


Figure 38. Application de textures à partir d'une photo historique du Trophée des Alpes.

Projection plane (ou orthogonale). L'extraction et placage de textures est possible à partir de ce type de projection, et tout particulièrement s'il s'agit d'images redressées. L'image est projetée sur le modèle 3D selon l'orientation du plan de rectification. Ce plan résulte donc orthogonale à la droite de projection de l'image sur le modèle. De ce fait, des relations dimensionnelles sont établies entre le modèle 3D et l'image redressée qui ne résulte pas déformée. Ce type de projection est utilisé pour les orthophotos et les dessins techniques. Généralement, pour ces derniers, l'apposition de textures n'a aucun intérêt, donc cette démarche n'est pas effectuée. Au

contraire, les textures à partir d'orthophotos sont très souvent plaquées sur les surfaces de la maquette.

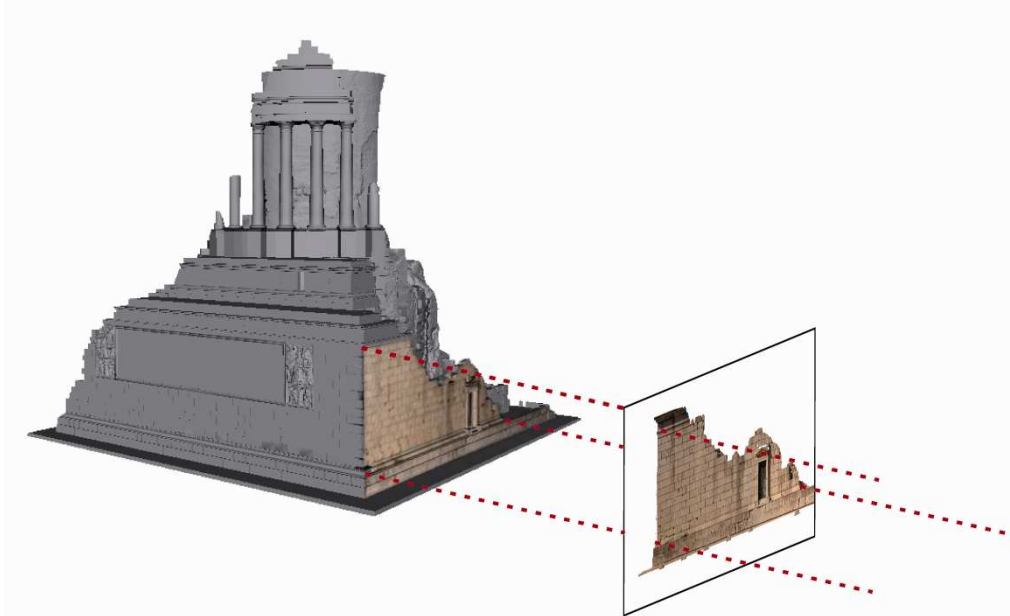


Figure 39. Application de textures à partir d'une photo redressée du Trophée des Alpes.

Projection mixte. S'il s'agit de dessins en pseudo perspective ou pseudo axonométrie, l'extraction de textures est effectuée premièrement à partir des peu d'éléments qui résultent correctement calibrées. Par la suite, le réglage de la profondeur du plan de l'image (s'il s'agit de pseudo perspectives) ou de l'échelle du plan (s'il s'agit de pseudo axonométries) permet d'adapter à tous moments la correspondance entre les entités de la maquette et l'image. De ce fait, d'autres entités peuvent devenir l'objectif de l'extraction de textures. A chaque changement de la profondeur ou de l'échelle du plan de l'image, les entités précédemment texturées perdent la correspondance avec les mêmes volumétries décrites dans l'image, mais les textures étant déjà extraites, la perte de relation entre modèle et image n'est pas significative.

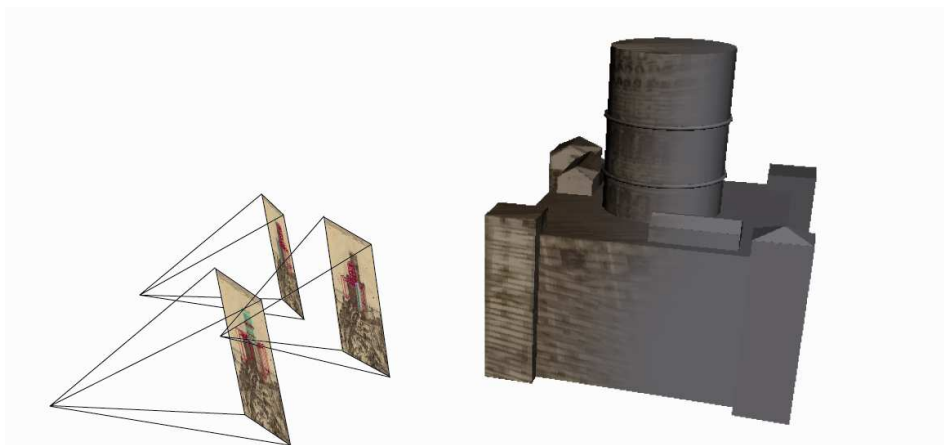


Figure 40. Application de textures à partir d'un dessin en pseudo perspective de la forteresse (ancien Trophée des Alpes).

La projection des textures sur le modèle permet d'afficher des informations concernant l'état hypothétique passé décrit par la source iconographique à partir de laquelle la maquette a été réalisée. Dans ce sens, l'application de textures offre au modèle une valeur supplémentaire. Toutefois, un tel processus d'enrichissement visuel est possible seulement si les sources le permettent ; à titre d'exemple, l'extraction de textures à partir d'une photo historique peut qualifier visuellement la maquette avec des informations importantes sur les matériaux ou sur la dégradation des surfaces. En revanche, l'extraction de textures à partir d'une pseudo perspective peut fournir des informations colorimétriques partielles, la qualité métrique et les détails étant réduits.

5.1.4. Comparaison des moyens de restitution

Ce paragraphe a décrit les processus de modélisation d'états historiques à partir de la comparaison d'états et de sources. La méthode est constante pour toutes les sources : il s'agit de comparer deux états à la fois, dont le premier est déjà restitué en 3D et le deuxième sera restitué à partir d'images. Toutefois, en fonction de la qualité et de la typologie de sources, différents niveaux de précision peuvent être atteints (Figure 41).

Dans le cas où les sources iconographiques suivent les règles de projection conique ou cylindrique, leur référencement, la modélisation 3D des géométries et la restitution de l'apparence visuelle ont un niveau élevé de fiabilité. En ce qui concerne les dessins en pseudo perspective ou pseudo axonométrie, à cause des informations véhiculées par ce genre de source, le référencement spatial résulte moins fiable. Pour telles techniques de restitution bidimensionnelle, les marges d'erreurs de la modélisation peuvent résulter plus importantes comme elle se base sur les relations de parallélisme et d'orthogonalité et sur la déduction de relations topologiques entre formes diverses. De même, les informations sur l'apparence visuelle peuvent résulter plus précises dans les cas de photos (à condition qu'elles ne soient pas abîmées ou que leur dimension ne soit pas modifiée).

	Référencement spatial	Modélisation géométrique	Apparence visuelle
Photos historiques	X	X	X
Dessins techniques, photos redressées	X	X	X
Peintures, gravures et dessins en perspectives	X	X	/
Dessins en pseudo perspective et pseudo axonométrie	/	X	/

Figure 41. Comparaison des reconstructions des états historiques en fonction des sources utilisées.

Pour conclure, le modèle de reconstruction 3D des états historiques devient un outil de travail qui permet plusieurs tâches : premièrement, il permet de décrire un état car il offre un certain niveau de détail et une apparence visuelle en fonction des informations véhiculées par la source iconographique ; deuxièmement, il devient un support de vérification et de validation de la morphologie de chaque état qui est partiellement décrit par la source. Enfin, dans le cas de sources iconographiques incertaines, il devient un outil de vérification et de validation de l'hypothèse proposée.

5.2. Structuration spatio-temporelle

Cette étape démarre au moment où l'on dispose d'un état restitué et structuré en fonction d'un point de vue spécifique. Les critères choisis pour la définition des entités et pour leur structuration morphologique sont variés. En effet, selon les divers objectifs de la représentation, différentes stratégies de décomposition seront envisageables. Cette approche est conçue pour accorder la même logique de structuration à tous les états de restitution d'un site (Figure 42). De ce fait, telle démarche de structuration assure par la suite la comparaison entre entités du même niveau hiérarchique (par exemple entre deux colonnes du Trophée des Alpes du II^e siècle et celles remises en places au XX^e siècle). La démarche repose sur deux étapes corrélées :

- Un découpage morphologique par le biais de quatre outils de structuration ;
- La création d'entités et groupes constituant des concepts auxquels sont attachées les diverses parties de la géométrie.

Ces étapes sont décrites toute de suite.

5.2.1. Outils de structuration

Une fois un état déjà modélisé, quatre opérations de modélisation permettent de restituer géométriquement les entités architecturales en fonction de la distribution temporelle des événements. Telles opérations concernent la création, la modification, la duplication et la suppression d'entités et elles sont décrites ci-après.

Création de nouvelles entités géométriques. Cette action permet de rajouter des entités qui sont visibles sur la source iconographique mais qui n'ont pas déjà été modélisées. Les entités géométriques sont créées par insertion de primitives géométriques. Leur position et orientation se base sur la projection perspective de l'image et sur les informations géométriques déduites à partir du modèle 3D de l'état actuel.

Duplication des entités géométriques. Cette action permet de copier des entités géométriques identiques, de les positionner correctement selon les indications fournies par la source documentaire à travers les outils de *rotation et translation* et de les modifier à travers les outils de déformation. Cette action se base sur la possibilité d'ancrer le système de référence (relatif à la forme sélectionnée) dans un sommet pertinent plutôt que dans son barycentre. Par la suite, l'entité peut être déplacée ou

orientée à partir de son pivot pour l'ancrer à un élément pertinemment choisi d'une autre entité. Enfin, elle peut être aussi positionnée en miroir.

Modification d'entités géométriques. Cette action consiste à identifier les entités géométriques 3D déjà créées dans un autre état (par comparaison) et à les modifier en fonction de l'apparence visuelle dans la source examinée. Tout particulièrement, premièrement une entité peut nécessiter d'être *divisée* en deux parties ayant des durées de vie différentes. Cette action permet de masquer les entités qui n'apparaissent pas dans l'époque temporelle choisie. L'action de division d'une entité en plusieurs parties implique la reconstruction des faces sur chacune des extrémités divisées, afin d'obtenir une entité entièrement fermée. Deuxièmement, plusieurs entités peuvent être *unies* si elles constituent une seule entité du point de vue morphologique au sein de toutes les époques. Cette opération peut nécessiter de déformer préalablement une ou plusieurs entités (ses faces et sommets) afin de faire correspondre les sommets qui seront unis.

Suppression d'entités géométriques. Cette action est possible quand une entité géométrique nécessite d'être cachée dans l'état temporel analysé.

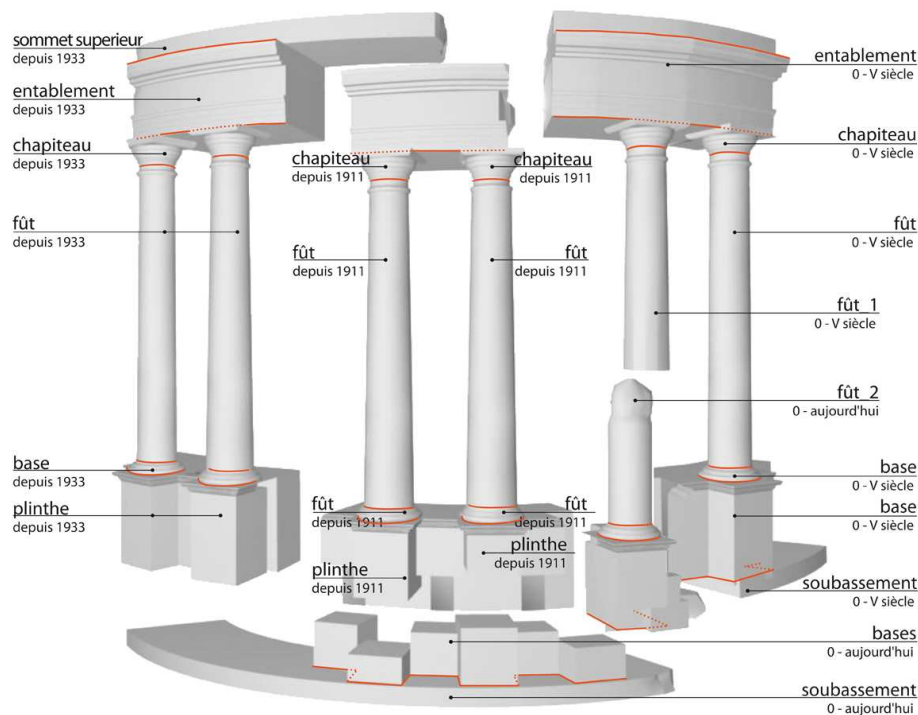


Figure 42. Découpage morphologique de la colonnade du Trophée des Alpes en fonction de la nature de l'analyse.

Les opérations de création, duplication, modification et suppression des entités contribuent à assigner des attributs temporels et de relation (désignant les transformations). Le paragraphe 5.3 décrit leur référencement temporel.

5.2.2. Création de groupes et entités

Si la représentation a comme vocation la comparaison des états subsistants et disparus de la maquette spatio-temporelle, la simple structuration en fonction du temps n'est pas toujours suffisante. En effet les entités qui font l'objet de la comparaison peuvent être des portions appartenant au même nœud temporel. L'association de concepts est donc attribuée d'une part en fonction de la logique de structuration hiérarchique originare de la maquette et d'autre part en fonction du temps (Figure 43).

Les entités de l'état en cours d'analyse sont structurées manuellement en fonction du point de vue choisi, grâce à des procédures permettant la création de groupes et sous-groupes. Chaque entité est définie par un symbole la représentant en proximité de son barycentre, et donc est exprimée selon les trois coordonnées spatiales x,y,z. Le référencement spatial des entités morphologiques se base sur la démarche méthodologique largement détaillée dans (De Luca 2006). Il s'agit premièrement de créer des entités (*string \$entity[]='radial -name "Entité" -pos 0 0 0'*), de les relier au barycentre de l'entité géométrique (*setAttr* et *connectAttr*), et enfin d'établir des liens entre entités, groupes et repères (*string \$sel[]='ls -sl'; string \$joiS[]='listConnections \$sel[0]'; string \$joiD[]='listConnections \$sel[1]'; connectJoint -pm \$joiS[0] \$joiD[0]; parent \$sel[0] \$sel[1];*).

La définition de concepts permet de leur rattacher diverses restitutions géométriques en fonction des sources. Les diverses restitutions peuvent concerner le nuage de points de l'état actuel, la restitution géométrique des diverses états (passés et actuel) et les diverses restitutions hypothétiques validées par les experts.

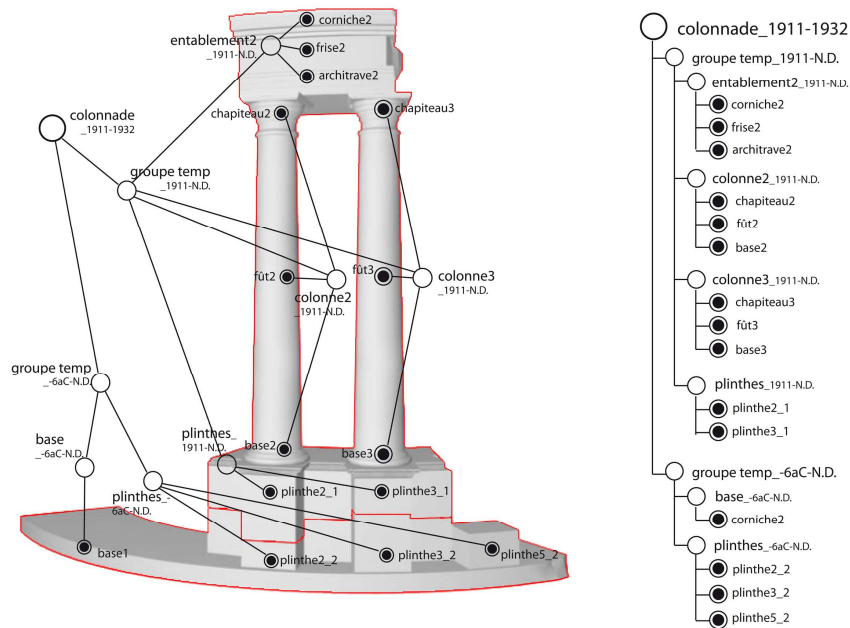


Figure 43. Associations des graphes à une certaine époque temporelle en fonction de la structuration hiérarchique choisie.

5.3. Qualification des entités

Dans le paragraphe précédente nous avons affirmé que les entités sont reconstruites manuellement sur la base de primitives en s'appuyant sur la comparaison et l'interprétation de deux états historiques différents. Bien que les restitutions ne doivent pas être effectuées selon un ordre temporel spécifique, le référencement temporel est plus simple si deux états temporels consécutifs (en sens chronologique ou anti chronologique) sont analysés. En effet l'utilisateur s'appuie sur le support iconographique pour caractériser les transformations au fil du temps. Le processus de qualification spatiale et temporelle se base sur :

- Le référencement temporel de la source iconographique ;
- Le référencement temporel des entités ;
- La qualification d'un niveau de certitude de la maquette spatiale ;
- L'exportation des informations temporelles et des relations concernant l'évolutivité.

Les tâches caractérisant l'implémentation sont décrites ci-après.

5.3.1. Référencement temporel de la source iconographique

Une fois la source insérée dans le système et référencée au niveau spatial, une procédure permet à l'utilisateur de rattacher les attributs temporels, notamment la date d'acquisition photographique (information ponctuelle) et l'époque décrite par la photo (période d'existence de l'artefact sans variations, caractérisée par deux dates de début et de fin). Les attributs sont attachés par le biais d'un script Mel du type *addAttr* et *setAttr* (Figure 44).

```
6 //create existence/demolition date : 1911-1933
7 addAttr -ln snapshotTime -at long -dv 1920 photo1;
8 setAttr -e -keyable true photo1.snapshotTime;
9 addAttr -ln startingDate -at long -dv 1911 photo1;
10 setAttr -e -keyable true photo1.startingDate;
11 addAttr -ln endingDate -at long -dv 1933 photo1;
12 setAttr -e -keyable true photo1.endingDate;
13
```

Figure 44. Fragment de code pour le référencement de l'iconographie.

5.3.2. Référencement temporel des entités : les attributs temporels et de relation.

Une fois la source référencée, elle devient le support guide pour la structuration temporelle. Le référencement temporel des entités se base sur la comparaison entre les éléments modélisés et la source prise en compte. Afin de sauvegarder l'historique de chaque élément morphologique, deux opérations doivent être effectuées : d'une part les entités doivent être qualifiées par leurs caractéristiques temporelles, d'autre part la nature des relations composées pendant le cycle de vie de

l'édifice doit être déclarée. Une procédure automatique permet de rattacher à chaque groupe ou sous-groupe du niveau supérieur :

- les attributs temporels d'existence, identifiant l'époque analysée, et caractérisés par les attributs de la source ;
- les attributs de relation, décrivant l'historicité des transformations, caractérisés par la nature de la transformation en relation avec l'époque précédente (simple variation morphologique ou changement de nature de l'artefact – division, union ou reconstruction).

Les attributs reliés aux groupes/sous-groupes sont appliqués à tous les éléments inférieurs de la hiérarchie basée sur la relation père-fils. Si des entités morphologiques existent le long de plusieurs époques, une procédure (*setAttr*) permet de mettre à jour les attributs temporels caractérisant l'existence (Figure 45).

```

6 //create existence/demolition date : 1911-1933
7 addAttr -ln ExistYear -at long -dv 1911 colonnade;
8 setAttr -e -keyable true colonnade.ExistYear;
9 addAttr -ln DestrYear -at long -dv 1933 colonnade;
10 setAttr -e -keyable true colonnade.DestrYear;
11
12 //update attribute value according to source value:
13 //select the picture first, and then the object
14 string $sel[]=`ls -sl`;
15 $newAttr = `getAttr ($sel[0]+".endingDate")`;
16 setAttr ($sel[1]+".DestrYear") $newAttr;

```

Figure 45. Fragment de code Mel pour rajouter des attributs temporels et mettre à jour ces derniers en fonction des valeurs temporels de la source iconographique référencée.

5.3.2.1. Attributs temporels

Les entités sont qualifiées par des *attributs temporels* concernant les dates de construction, d'existence, de début et fin de démolition. Ces quatre attributs permettent facilement de calculer les *intervalles* de création, d'existence et de démolition. Ces intervalles peuvent avoir des granularités très différentes. De ce fait, en ce qui concerne la définition des attributs temporels, les diverses opérations documentées dans le paragraphe 5.2 sont donc implémentées de la façon suivante. Toutes les opérations se basent sur l'affectation d'attributs à travers des scripts du type *addAttr* et *setAttr*.

- Création. Une procédure permet de rattacher à une simple entité ou à un groupe d'entités (et aux géométries reliées) les attributs temporels de début de la construction (si disponible grâce aux sources) et d'existence (caractérisés par la période d'existence de la source). Tels attributs peuvent être modifiés manuellement par l'utilisateur à tous moments, si par exemple d'autres sources démontrent la présence d'un même objet dans d'autres époques (Figure 46).
- Division. Cette action permet de séparer une entité en plusieurs parties conservant les attributs temporels de l'entité originelle. En définissant la

relation d'une de ses parties avec la source correspondant à une nouvelle époque, une procédure permet de rattacher les attributs temporels pertinents à la nouvelle entité.

- Union. Cette action permet d'assembler deux entités en une seule, à condition que les respectifs attributs temporels soient cohérents (identiques), ou qu'une des deux entités ne soit pas encore définie par des attributs temporels (`addAttr -ln union -at long -dv 1670 entity; setAttr -e -keyable true entity.union;`). En cas contraire, une procédure souligne la contradiction et l'utilisateur est tenu à vérifier les entités.
- Destruction. Cette action permet de définir la date de démolition d'une entité à travers une procédure Mel du type `hide` (Figure 46).

```
5
6 //create attributes for entities
7 addAttr -ln ExistYear -at long -dv 1300 Entity;
8 setAttr -e -keyable true Entity.ExistYear;
9
10 //deleting
11 hide $csObjsDate[$i];
12 setKeyframe -breakdown 1 -hierarchy none
13 -controlPoints 0 -shape 0 $csObjsDate[$i];
14
```

Figure 46. Fragment de code Mel concernant les attributs de création et de démolition des entités.

5.3.2.2. Attributs de relation

Tels attributs spécifient la nature de la transformation d'un groupe d'entités au fil du temps. Une procédure automatique stocke le type de transformation, la date de la transformation, la durée, les entités et les groupes concernées avant/après la transformation et les éventuels nouveaux groupes constitués (Figure 47). De telles attributs peuvent être affectés de deux façons : au moment de la structuration (paragraphe 5.2.1) ou à la sélection manuelle d'un ou plusieurs groupes. Les opérations suivantes permettent donc de sauvegarder l'historicité des évolutions.

- Création. Cette procédure permet de créer des groupes (d'entités temporelles) qualifiant la conception de l'édifice à un moment donné.
- Division. Cette opération permet de séparer les entités en plusieurs groupes à une certaine époque temporelle.
- Union. Cette opération permet de rassembler deux groupes dans un seul à une certaine époque temporelle.
- Destruction. Cette action permet de définir la date de démolition d'un groupe ou d'une classe.

- Reconstruction. Cette action identifie un lien entre deux groupes qui ne sont pas simultanés.
- Dégradation. Cette opération définit l'ensemble d'entités touchées par une détérioration morphologique.

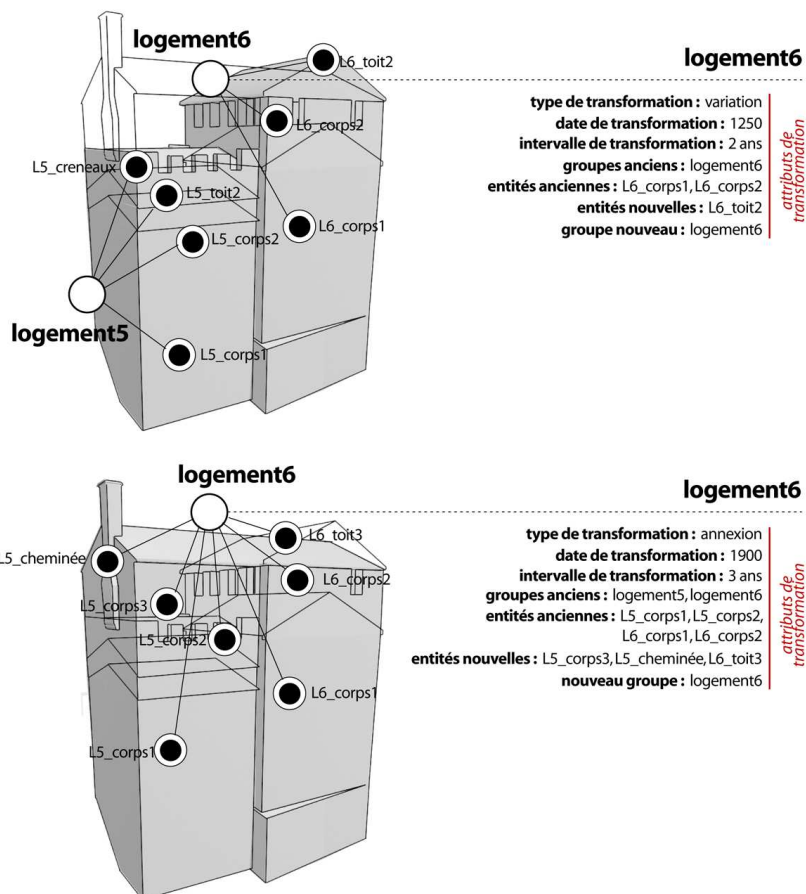


Figure 47. Qualification des transformations à travers les groupes. Les groupes deviennent les noyaux autour desquels l'historique d'un édifice est sauvegardé.

5.3.2.3. Visualisation des états d'existence

Du moment où les entités sont décrites par des attributs temporels, une procédure Mel permet de visualiser des *diagrammes d'état* décrivant la durée de vie de chaque entité géométrique de la scène. Ces diagrammes (Figure 48) représentant les états d'existence des entités, affichent les dates de création, de démolition, et la durée de vie (`setKeyframe -breakdown 1 -hierarchy none -controlPoints 0 -shape 0 $csObjsDate[$i];`). L'avantage de cet outil est que l'utilisateur peut directement changer les attributs temporels (début, fin et durée) instantanément à l'aide du graphique. Ces diagrammes peuvent donc être utilisés comme complément à la 3D : ils peuvent être modifiés, réduits ou agrandis de façon dynamique dans le but de modifier les valeurs temporelles dans la table de géométries.

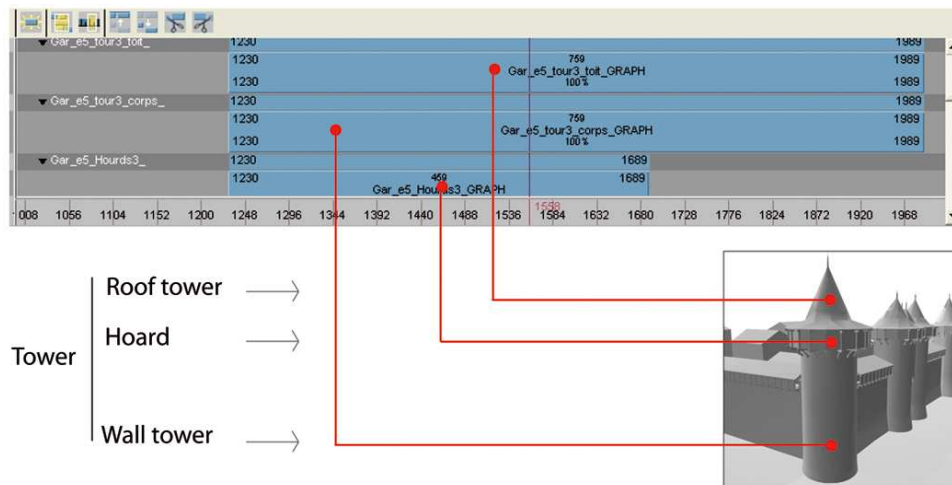


Figure 48. Visualisation des diagrammes d'états des hourdes de la Tour St. Paul du Château Comtal de Carcassonne. Chaque diagramme d'état affiche le nom de l'élément géométrique, la date de construction et de démolition et la durée de vie.

5.3.3. Qualification de l'incertitude

Si les sources sont hétérogènes et imprécises, alors la maquette spatio-temporelle nécessite d'être qualifiée en fonction de leur fiabilité. Tout particulièrement, plusieurs facteurs doivent être pris en compte :

- Le niveau hypothétique ou certain de la maquette ;
- L'incertitude spatiale et temporelle des entités géométriques du modèle descriptif ;
- Le processus d'interprétation adopté.

La visualisation de ces facteurs se traduit par l'attribution de valeurs aux entités géométriques de la maquette. Pour cela, pendant le processus de modélisation, il suffit d'attribuer à l'entité géométrique des attributs qui indiquent le niveau de certitude accordé à la restitution. Les trois aspects sont traités comme suit.

La classification de la restitution. Chaque entité (ou groupe) doit être caractérisée par un attribut identifiant si la morphologie est :

- *Certaine.* La restitution est certaine si les entités morphologiques sont actuellement existantes ou si les sources à partir desquelles la restitution est faite sont certaines.
- *Hypothétique.* Les restitutions hypothétiques sont effectuées à partir d'interprétations sur la base de sources historiques. Nous assumons que toutes restitutions hypothétiques doivent être validées par des experts (archéologues et historiens).

Le type d'incertitude. La restitution (hypothétique et certaine) est qualifiée par des indices qui révèlent si l'incertitude est liée à des aspects spatiaux de l'entité (morphologie ou position) ou si elle concerne le niveau temporel (la période de création, d'existence, de modification, de démolition d'un artefact).

L'incertitude spatiale est déterminée par:

- présence/absence de l'entité dans la source;
- qualité de la source (état de conservation, résolution de l'image, etc);
- niveau de résolution géométrique (selon le niveau de précision de la source);
- niveau de certitude du raisonnement archéologique.

L'incertitude temporelle est déterminée par :

- information temporelle sur la source décrivant l'entité ;
- granularité temporelle qui qualifie les intervalles de temps concernant les états et les transitions, notamment la période de création, d'existence, de modification et de démolition de l'artefact.
- niveau de certitude du raisonnement archéologique.

Le type d'interprétation. Dans le cas des représentations hypothétiques, la restitution peut être classifiée en fonction du moyen interprétatif utilisé :

- analogie ;
- déduction ;
- approche mixte.

Pour chaque entité, la création des attributs et l'affectation de valeurs se fait à partir de l'interface développée en Mel. L'utilisateur a la possibilité de créer des attributs préconfigurés ou nouveaux. En ce qui concerne l'incertitude temporelle, l'interface est prédisposée pour gérer des granularités différentes (le siècle, l'an, le mois, le jour). La granularité finalement choisie, un menu déroulant permet de restreindre la période d'incertitude à des portions de temps plus courtes correspondantes au créneau temporel sélectionné (à ce propos, se reporter à l'Annexe D). En ce qui concerne les autres types d'incertitude, les indices les caractérisant sont exprimés par des pourcentages. Les attributs sont à tous moments modifiables ou effaçables.

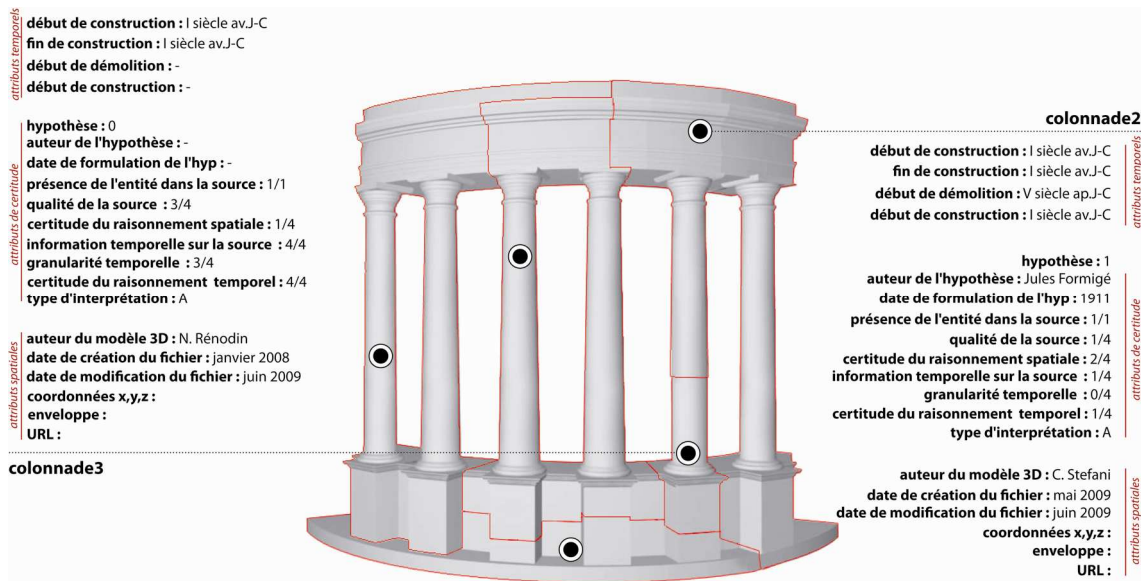


Figure 49. Qualification des entités par des attributs temporels, spatiaux et de certitude.

5.3.4. Archivage des attributs et des représentations

Les sources et les données produites en phase de traitement de la maquette spatio-temporelle sont respectivement conservées et exportées en plusieurs formats. Chaque entité est définie par des restitutions géométriques en base polyédrique et par des attributs spatiaux, temporels, et de certitude.

En ce qui concerne l'archivage, d'une part les représentations numériques sont conservées en format ascii. Ce format étant libre, il garanti la liberté d'utilisation dans d'autres applications. D'autre part, une fois la structuration effectuée pour toutes les époques, des procédures automatiques permettent d'exporter les attributs associés aux différentes entités géométriques sous forme de fichier en format .txt : les attributs spatiaux, temporels, de certitude, et les types de transformations subies. Ce fichier en format de texte est structuré pour pouvoir être importé dans la base de donnée MySQL. Les attributs résultent stockés dans la base de données pour des applications sur le web (à ce propos se reporter au chapitre 6). Une procédure permet de :

- créer un fichier en format .txt pour la sauvegarde des informations (*fopen*);
- sélectionner toutes les entités référencées dans le temps ;
- pour chaque entité (et les éléments de sa hiérarchie), récupérer les attributs temporels, de relation et de certitude (*getAttr*);
- pour chaque entité (et les éléments de sa hiérarchie), écrire dans le fichier .txt les renseignements sur le nom, les attributs et les valeurs affectées (*fprint*).

En ce qui concerne l'exportation, les représentations numériques sont exportées en format .nmo à travers des méthodes de conversion pour des systèmes de consultation sur le web. Actuellement les moteurs d'affichage temps réel peuvent gérer un autre format libre pour applications interactives 3D : le format d'échange COLLADA¹³ (.dae). Toutes les entités géométriques actuellement exportées en .nmo pourraient être donc exportées en .dae. Le format .nmo permet divers avantages : premièrement un plug-in gratuit (Virtools Web Player) permet de lire ce format dans les principaux navigateurs Internet Explorer, Firefox et Safari ; deuxièmement les entités géométriques sont manipulables à travers des blocs DEV internes à Virtools et de façon interactive (à ce propos se reporter au chapitre 6). Les diverses représentations numériques sont donc stockées dans une base de données en format .nmo. De même, les attributs rattachés aux entités (et au préalable stockés dans des fichiers .txt) seront inclus dans les divers tableaux de la base de données MySQL.

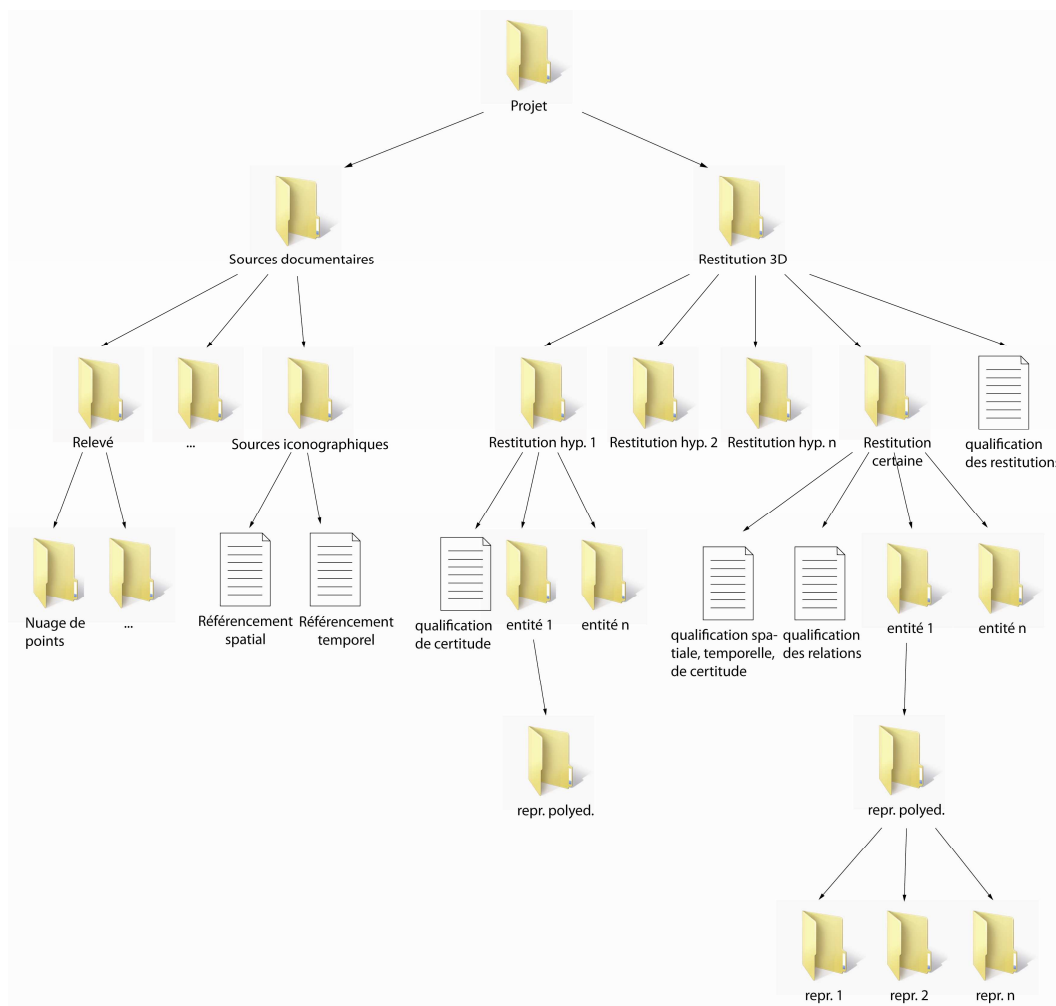
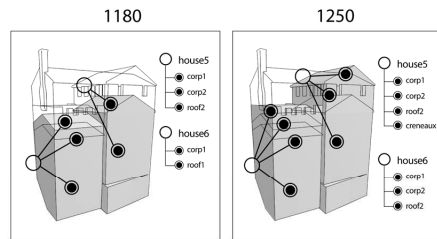


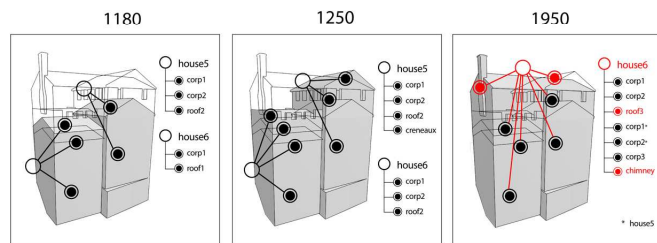
Figure 50. Gestion des projets : la structure des dossiers.

¹³ COLLADA (COLLABorative Design Activity) est un format d'échange pour applications interactives 3D, géré par le consortium Khronos. Il définit un schéma XML standard ouvert d'échange entre logiciels qui autrement conservent leurs données en fichiers de format incompatibles.

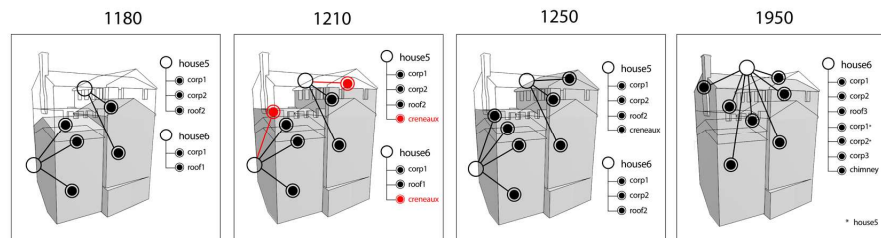
a. (A) — (B)



b. (A) — (B) — (C)



c. (A) — (A') — (B) — (C)



d. (Z) — (A) — (A') — (B) — (C)

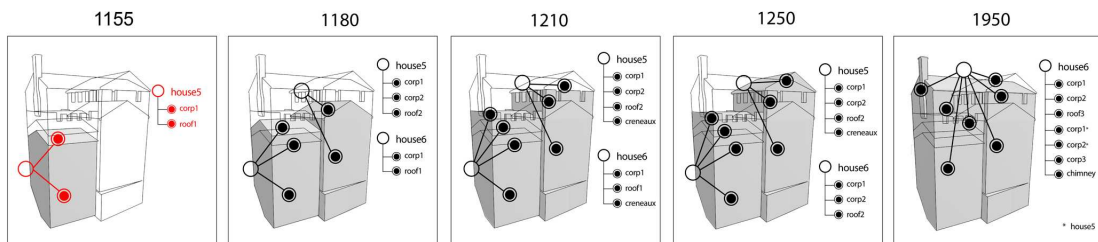


Figure 51. Insertion des nouvelles entités (en rouge) suite à la nouvelle découverte d'une étape temporelle.

5.3.4.1. L'exploitation de la maquette évolutive

Dans les industries navale, automobile, aéronautique et aérospatiale, les maquettes numériques sont toujours utilisées pour la certification du montage, l'inspection de la disposition des pièces et la vérification des interférences (Sun 2007; Döllner et al. 2000; Garbade & Dolezal 2007). Les maquettes évolutives du patrimoine historique peuvent être comparées à celles adoptées pour décrire le processus de l'ingénierie des systèmes. Si dans l'industrie l'objectif est de décrire et manipuler l'entier cycle de vie d'un produit, la finalité majeure de la structuration spatio-temporelle des maquettes patrimoniales est d'implémenter le système dès qu'une nouvelle source permet de découvrir un nouvel état temporel.

Dans cette section, on analyse comment la structure change à l'insertion d'une nouvelle étape temporelle. Pour éclaircir le concept, on fait suivre un exemple paradoxal. La Figure 51 illustre l'insertion d'une nouvelle étape au début, à la fin, ou dans une position intermédiaire du processus. Pour valider l'expérience, on se demande comment le système va réagir dès qu'une nouvelle source nous oblige à insérer un état temporel antérieur, intermédiaire ou postérieur. Imaginons l'hypothèse absurde que les sources documentaires sur le site de Carcassonne nous autorisent à créer une maquette évolutive basée sur deux états seulement. La décomposition se base sur la connaissance acquise sur l'évolution du site entre le XIIe et la moitié du XIIIe siècle (Figure 51, cas a). Les cas b, c et d illustrent les changements structurels si une étape temporelle est rajoutée au début (cas d), à la fin (cas b) ou dans une position intermédiaire (cas c) du processus. Selon ces trois conditions, la structure morphologique est mise à jour en deux différentes façons :

- une nouvelle entité indépendante et ses attributs sont créés (cas c), de ce fait des nouvelles valeurs sont insérées par une procédure ;
- les attributs temporels de l'entité existante sont modifiés (cas b et d) ;
- une transformation est rattachée au nouveau groupe (cas d).

Il est intuitif que si des nouvelles entités sont insérées dans le processus, il n'y a aucune difficulté à modifier le système. En revanche, la nature des transformations peut poser des difficultés de structuration. En effet la nature des corrélations entre les entités est entièrement modifiée (cas b) si la transformation implique une division, l'union ou la reconstruction d'un édifice. Pour tel genre de transformations, il s'agit donc d'enregistrer les nouvelles relations réciproques des entités. A ce propos, dans le cas (d) en figure, en 1950 le groupe d'entités constituant l'édifice 5 a disparu : il a changé d'identité comme il a été annexé à l'édifice 6.

5.4. Conclusions

Si à la forme architecturale est associée une description sémantique, l'édifice peut être considéré comme un système de connaissances. A partir de l'observation et de la connaissance de l'objet réel, il est possible de définir un modèle décrivant l'édifice, les relations morphologiques de ses parties, ses règles géométriques et les connaissances sur l'objet. L'outil numérique permet finalement de concevoir le modèle de connaissance comme le support de différentes représentations en fonction des

informations géométriques et de l'interprétation des données. Toutefois, la restitution des états passés à partir des sources iconographiques soulève d'autres problématiques très importantes. Bien qu'à présent les méthodes de visualisation tridimensionnelles soient largement utilisées dans la recherche et la communication du patrimoine historique, pour assurer la minutie du travail d'un point de vue intellectuel et technique, il est nécessaire d'établir les normes qui répondent aux propriétés de la représentation 3D. Le plus grand support à la fondation théorique en visualisation des informations est donné par le géographe et cartographe français Bertin avec son œuvre *Sémiologie graphique - les diagrammes, les réseaux, les cartes* (Bertin 1967). Une trentaine d'années plus tard, (Tufte 2001) propose des directives pour encourager la précision, l'efficacité et la clarté graphique. Spécifiquement à notre domaine, en 2006 la Charte de Londres¹⁴ est née dans le but de répondre aux questions en visualisation 3D dans la recherche et la communication en patrimoine historique. Cette Charte vise à définir les objectifs et les principes de base concernant l'utilisation des méthodes de visualisation 3D dans le cadre de la responsabilisation, la transparence, la documentation, les normes, la durabilité et l'accès aux informations. Cet objectif peut être réalisé si la maquette évolutive intègre un niveau sémantique (sauvegarde des relations géométriques entre ses parties), l'évolution historique (sauvegarde des relations temporelles) et la qualification d'un niveau de fiabilité de la représentation en fonction des sources utilisées (à partir de l'interprétation).

¹⁴ The London Charter. <http://www.londoncharter.org/>