



HAL
open science

Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux. Modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices

Chiara Stefani

► **To cite this version:**

Chiara Stefani. Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux. Modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices. Base de données [cs.DB]. Arts et Métiers ParisTech, 2010. Français. NNT : 2010ENAM0028 . pastel-00522122

HAL Id: pastel-00522122

<https://pastel.hal.science/pastel-00522122v1>

Submitted on 29 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n°432 : SMI

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité Conception

présentée et soutenue publiquement par

Chiara STEFANI

le 16 Septembre 2010

Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux

Modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices

Directeur de thèse : **Philippe VERON**

Co-Directeur de thèse : **Michel FLORENZANO**

Co-Encadrement de thèse : **Livio DE LUCA**

Jury

Mme Bianca FALCIDIENO, Research Director, IMATI, CNR Italie

Mme Elisabeth ZADORA-RIO, Directeur de recherche, CITERES, CNRS

M. Jean-Claude LEON, Professeur des universités, INPG, ENSHMG Grenoble

M. Frédéric MERIENNE, Professeur des universités, LE2I, Arts et Métiers ParisTech

Mme Michela SPAGNUOLO, CNR Senior Research, IMATI, CNR Italie

M. Philippe VERON, Professeur des universités, LSIS, Arts et Métiers ParisTech

M. Michel FLORENZANO, Directeur de recherche CNRS, MAP, CNRS

M. Livio DE LUCA, Docteur Ingénieur de recherche CNRS, MAP, CNRS

Rapporteur

Rapporteur

Examinateur

Examinateur

Examinateur

Directeur

Co-directeur

Encadrant

**T
H
È
S
E**

Remerciements

Je tiens à remercier *Philippe Véron* pour le temps qu'il m'a consacré et son engagement assidu, pour les précieux conseils et la liberté qu'il m'a accordée au cours de ces années ; *Michel Florenzano*, de l'accueil qu'il m'a réservé au sein du laboratoire MAP, de ses encouragements et son suivi, et pour m'avoir offert la possibilité de participer à de nombreux événements de diffusion et valorisation des recherches menées au laboratoire ; *Livio De Luca*, qui m'a accompagnée et guidée dans cette étude, et m'a aidée à consolider mes connaissances en me donnant la possibilité de me confronter avec des thématiques parallèles et complémentaires au sein de ce laboratoire.

Je remercie *Michel Berthelot* pour son sens de l'organisation et son dynamisme, pour m'avoir offert la possibilité de participer à diverses expériences conduites sur le terrain et de prendre en main divers outils de la plateforme technique du laboratoire ; *Menehould* et *Pascal* pour leur soutien logistique et informatique.

Je remercie *Jean-Yves Blaise* pour les conversations très enrichissantes qui m'ont permis de rentrer dans le vif du sujet lié à la modélisation spatio-temporelle. Je tiens à remercier spécialement *Ivona Dudek*, qui grâce à ses critiques constructives m'a aidée à affiner ce travail ; *Alberto Sdegno* qui m'a initiée à la problématique de la représentation au cours de mes études universitaires en Italie.

Mes remerciements vont aussi à tous mes collègues qui ont contribué à créer une ambiance agréable au laboratoire et pour leur esprit de collaboration, un point fort de cette équipe : *Anna, Aymeric, Aurélie, Céline, Chawee, Francesca, Julie, Matthieu, Meriem, Micheline, Nassim, Noémie, Paola, Tudor*. Je suis reconnaissante à *Aurélie, Anna, Céline, Eric*, qui m'ont donné de nombreuses explications concernant la langue française.

Mes remerciements vont aussi à mes amis qui ont supportée mes humeurs et qui m'ont accompagnée dans mes loisirs, et à mes parents *Mariarosa* et *Gianfranco* qui m'ont soutenue malgré la distance.

Je remercie enfin *Nicolas*, qui m'a accompagnée et encouragée pendant la période de rédaction avec énergie.

Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux. Modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions des édifices

RESUME : Actuellement la plupart des restitutions en patrimoine historique décrivent les édifices patrimoniaux comme un ensemble d'entités statiques et inaltérables. Toutefois, les sites historiques peuvent avoir une histoire très complexe, parfois riche d'évolutions, parfois seulement partiellement connue grâce aux sources documentaires. Trois aspects importants conditionnent l'analyse et l'interprétation du patrimoine historique. Tout d'abord, les bâtiments peuvent subir des transformations importantes ou ils peuvent disparaître au fil du temps. Deuxièmement, l'incertitude est très fréquente en patrimoine historique sous diverses formes : parfois il est impossible de définir la datation, parfois la forme originelle du bâtiment ou sa position spatiale. Troisièmement, la documentation historique concernant les états passés est hétérogène, douteuse, incomplète, et parfois contradictoire. Cette thèse propose une approche intégrée de modélisation capable d'une part de structurer les entités morphologiques spatiales en fonction du temps, d'autre part de conserver l'historique des évolutions architecturales. De plus, des hypothèses multiples à propos des sites historiques devraient être prises en compte. Comme la géométrie n'est pas suffisante pour comprendre les transformations des sites historiques, une interface de visualisation basée sur des graphes est intégrée pour manipuler les géométries et pour comprendre les transformations des édifices et leurs relations.

Mots clés : Patrimoine historique, transformations d'édifices, modélisation spatio-temporelle, hypothèses multiples, graphes historiques, incertitude.

Space-time digital models of edifices in cultural heritage. Time modeling and multi-representation of edifices.

ABSTRACT : Nowadays most digital reconstructions in cultural heritage describe building heritage as a whole of static and unchangeable entities. However, historical sites can have a rich and complex history, sometimes full of evolutions, sometimes only partially known by means of documentary sources. Three significant aspects condition the analysis and the interpretation of cultural heritage. Firstly, buildings can undergo significant transformations or they can disappear over time. Secondly, uncertainty is prevalent in cultural heritage in various forms: sometimes it is impossible to define the dating period, sometimes the building original shape or its spatial position. Thirdly, historical documentation concerning past states can be heterogeneous, dubious, incomplete and even contradictory. This thesis proposes an integrated modeling approach capable firstly of structuring spatial elements according to time, secondly of retaining the history of architectural evolutions, thirdly of taking into account assumptions about historical sites. As geometry is not sufficient to understand historical site transformations, a graph visualization framework is integrated to manipulate geometries and to understand building transformations and their relations.

Keywords : Cultural heritage, building transformations, spatio-temporal modeling, multiple hypotheses, historic graphs, uncertainty.



Table de matières

1. INTRODUCTION.....	11
1.1. CONTEXTE.....	11
1.2. OBJECTIF	12
1.3. PORTÉE, LIMITES, APPORTS PRINCIPAUX	13
1.4. TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION	13
1.5. STRUCTURE DU DOCUMENT	14
2. RESTITUTION DES ÉTATS PASSÉS.....	15
2.1. PROBLÉMATIQUE.....	15
2.1.1. <i>La collecte iconographique</i>	16
2.1.2. <i>La fiabilité des sources</i>	18
2.1.3. <i>L'interprétation des sources</i>	22
2.2. ETAT DE L'ART DES APPROCHES POUR LA REPRÉSENTATION DES ÉTATS PASSÉS	23
2.2.1. <i>Approches qui visent à représenter l'apparence visuelle des états</i>	24
2.2.2. <i>Approches qui visent à décrire le contexte topographique</i>	25
2.2.3. <i>Approches qui visent à décrire la morphologie</i>	25
2.2.4. <i>Approches qui visent à représenter les évolutions</i>	27
2.2.5. <i>Approches qui visent à représenter les incertitudes</i>	28
2.2.6. <i>Analyse critique des expériences présentées</i>	30
2.3. CONCLUSIONS	31

3.	REPRÉSENTATION DES TRANSFORMATIONS	33
3.1.	PROBLÉMATIQUE.....	34
3.1.1.	<i>La perception d'un seul état.....</i>	34
3.1.2.	<i>Les transformations du patrimoine historique.....</i>	35
3.1.2.1.	Les types de transformations.....	36
3.1.2.2.	La durée des transformations	37
3.1.3.	<i>Modélisation spatio-temporelle d'édifices patrimoniaux</i>	37
3.2.	ETAT DE L'ART DES MODÈLES EXISTANTS POUR LA REPRÉSENTATION DES TRANSFORMATIONS	39
3.2.1.	<i>Modèles visant à représenter les objets.....</i>	40
3.2.2.	<i>Modèles visant à représenter les changements.....</i>	41
3.2.3.	<i>Modèles visant à représenter le mouvement.....</i>	43
3.2.4.	<i>Modèles visant à décrire des échelles multiples de représentation</i>	44
3.2.5.	<i>Modèles visant à représenter le processus</i>	45
3.2.6.	<i>Analyse critique des modèles de conception.....</i>	46
3.3.	CONCLUSIONS.....	47
4.	ARCHITECTURE GLOBALE DE L'APPROCHE PROPOSÉE.....	49
4.1.	PRÉOCCUPATIONS RETENUES	50
4.2.	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	51
4.2.1.	<i>Le modèle pour la description temporelle.....</i>	51
4.2.1.1.	Le système de notation.....	51
4.2.1.2.	Modélisation des états et des évolutions	54
4.2.1.3.	Les résolutions.....	55
4.2.2.	<i>Le modèle de structuration spatiale</i>	59
4.2.2.1.	La description sémantique	60
4.2.2.2.	Organisation morphologique en fonction du temps.....	62
4.2.2.3.	Granularité spatiale.....	63
4.3.	DÉMARCHE GLOBALE	63
4.4.	ENVIRONNEMENT DE PROGRAMMATION	66
4.4.1.1.	Le langage Mel	66
4.5.	CONCLUSIONS.....	68
5.	APPROCHE DE RECONSTRUCTION 3D DES ÉTATS ET OUTIL ASSOCIÉ	69
5.1.	RECONSTRUCTION 3D DES ÉTATS.....	70
5.1.1.	<i>Référencement spatial des sources.....</i>	71
5.1.2.	<i>Modélisation géométrique 3D de chaque état</i>	75
5.1.3.	<i>Restitution de l'apparence visuelle</i>	76
5.1.4.	<i>Comparaison des moyens de restitution.....</i>	78
5.2.	STRUCTURATION SPATIO-TEMPORELLE	79
5.2.1.	<i>Outils de structuration</i>	79
5.2.2.	<i>Création de groupes et entités.....</i>	81
5.3.	QUALIFICATION DES ENTITÉS	82
5.3.1.	<i>Référencement temporel de la source iconographique</i>	82
5.3.2.	<i>Référencement temporel des entités : les attributs temporels et de relation.....</i>	82
5.3.2.1.	Attributs temporels.....	83
5.3.2.2.	Attributs de relation	84
5.3.2.3.	Visualisation des états d'existence	85
5.3.3.	<i>Qualification de l'incertitude</i>	86

5.3.4.	<i>Archivage des attributs et des représentations</i>	88
5.3.4.1.	<i>L'exploitation de la maquette évolutive</i>	91
5.4.	CONCLUSIONS	91
6.	APPROCHE DE VISUALISATION ET DE CONSULTATION DES ÉVOLUTIONS ET OUTIL ASSOCIÉ	93
6.1.	ÉTAT DE L'ART DES SYSTÈMES DE VISUALISATION D'INFORMATIONS TEMPORELLES	94
6.1.1.	<i>Systèmes linéaires de représentation</i>	95
6.1.2.	<i>Systèmes bidimensionnels de représentation</i>	96
6.1.3.	<i>Systèmes tridimensionnels de représentation</i>	97
6.1.4.	<i>Systèmes hybrides de représentation</i>	97
6.1.5.	<i>Analyse critique des systèmes</i>	98
6.2.	STRUCTURATION D'INFORMATIONS TEMPORELLES.....	99
6.2.1.	<i>Architecture du système</i>	100
6.2.2.	<i>Environnement de développement</i>	101
6.2.3.	<i>La scène 3D</i>	102
6.2.4.	<i>L'interface des graphes historiques</i>	102
6.2.5.	<i>La base de données</i>	102
6.2.6.	<i>Dialogue entre les parties du système</i>	105
6.3.	OUTILS DE SÉLECTION ET MANIPULATION DES TRANSFORMATIONS.....	105
6.3.1.	<i>La formulation de requêtes temporelles</i>	105
6.3.2.	<i>Visualisation des états historiques</i>	106
6.3.3.	<i>La visualisation des évolutions</i>	107
6.3.4.	<i>Interaction entre les graphes et la géométrie</i>	108
6.3.5.	<i>Modification des résolutions des évolutions</i>	111
6.4.	OUTILS DE CONSULTATION ET MANIPULATION EN FONCTION DES CRITÈRES TEMPORELS	111
6.4.1.	<i>Visualisation des états temporels</i>	112
6.4.2.	<i>Visualisation et manipulation des hypothèses</i>	113
6.4.3.	<i>Visualisation des incertitudes spatiales</i>	116
6.4.4.	<i>Visualisation des incertitudes temporelles</i>	117
7.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	119
7.1.	LIMITES	119
7.1.1.	<i>Granularité spatiale de la structuration</i>	119
7.1.2.	<i>Modélisation des évolutions</i>	120
7.1.3.	<i>Sauvegarde de l'historique des évolutions</i>	120
7.1.4.	<i>Topologie et granularité temporelle</i>	120
7.1.5.	<i>Exploitation de l'historique des évolutions</i>	121
7.2.	PERSPECTIVES DE RECHERCHE	121
7.2.1.	<i>Mise en relation des représentations passées avec l'iconographie</i>	121
7.2.2.	<i>Spatialisation de l'incertitude</i>	123
7.2.3.	<i>Résolutions multiples en fonction des sources</i>	127
7.2.4.	<i>Graphes historiques tridimensionnels</i>	128
7.2.5.	<i>Domaines d'application</i>	128
7.3.	RÉFLEXIONS CONCLUSIVES.....	130
	BIBLIOGRAPHIE	131

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	143
ANNEXE A - PANORAMA ETENDU DES TRANSFORMATIONS	147
ANNEXE B - NOTIONS DE BASE DE MODELISATION SPATIO-TEMPORELLE	151
ANNEXE C - COMPARAISON DES MODELES SPATIO-TEMPORELS.....	157
ANNEXE D - DISPOSITIF DE STRUCTURATION TRIDIMENSIONNELLE D'EDIFICES EN FONCTION DU TEMPS.....	161
ANNEXE E - NUBES TEMPUS - SYSTEME DE CONSULTATION DES TRANSFORMATIONS TEMPORELLES SUR INTERNET	169
ANNEXE F - REPRESENTATION DES EVOLUTIONS.....	177
ANNEXE G - ALGORITHME DE VISUALISATION DES GRAPHES SUR UN ÉDIFICE	185
ANNEXE H - LISTE DE PUBLICATIONS	189

1. Introduction

1.1. Contexte

Depuis quelques années, dans les domaines de l'architecture et de l'archéologie, les technologies informatiques sont en train de transformer les méthodes d'acquisition et de gestion de l'information et se révèlent des outils nécessaires à la description, à la compréhension et à la documentation du patrimoine. Les restitutions tridimensionnelles des édifices ont fait ressortir des nouvelles questions sur la compréhension des sites historiques : par rapport à la documentation bidimensionnelle traditionnelle tel que croquis, plans, coupes, vues de face, ou encore perspectives ou axonométries, la visualisation en 3D d'une part offre des informations métriques sur la forme, la position et la texture des artefacts, d'autre part permet de vérifier les rapports réciproques entre les divers éléments morphologiques de l'artefact.

A plus de trente ans de la naissance de la CAO, les maquettes numériques en temps réel peuvent donc représenter une aide très importante aux études sur le patrimoine. Toutefois, si les reconstructions 3D permettent un traitement et un rendu d'informations dimensionnelles de l'état actuel de l'artefact grâce aux nouveaux dispositifs de mesure et d'exploitation des techniques numériques, la représentation et la gestion des états passés et disparus ouvrent de nombreuses problématiques. Deux facteurs conditionnent la visualisation des états passés. Premièrement, les restitutions en archéologie et architecture sont généralement reliées à un seul moment historique (l'état actuel, ou le moment de réalisation d'un édifice et non l'état de décadence d'un bâtiment). Comme la plupart des recherches le montrent, l'édifice est trop souvent considéré comme une entité statique et inaltérable. En réalité l'édifice n'est pas constant dans le temps : au contraire, il est en évolution continue et son état actuel est seulement le point de départ de l'analyse des évolutions morphologiques subies au fil du temps. L'édifice devrait donc être considéré comme dynamique : sa morphologie peut en effet varier et le temps est la dimension qui permet d'apprécier les variations de forme et de position. Deuxièmement, quand on étudie des bâtiments historiques, la documentation qui concerne ses états antérieurs est, par nature, parfois contradictoire, hétérogène, incertaine et incomplète. Or, ces informations sont principalement extraites à partir de l'interprétation de ces sources documentaires. Par conséquent, la maquette numérique doit mettre en évidence l'ensemble des contradictions et des manques d'informations reliés à la restitution morphologique. En architecture ou archéologie l'interprétation sur les sources mène à la formulation des hypothèses. D'une manière générale, plus on remonte dans le temps, moins les documents sont précis et donc plus les hypothèses de restitution deviennent multiples et parfois contradictoires.

La maquette 3D des états disparus construite à partir des sources documentaires peut donc avoir différentes restitutions en fonction du niveau de connaissance offert par les sources documentaires. Des restitutions multiples au fil du temps peuvent être produites autour d'un modèle de description qui devient le moyen d'accès privilégié aux informations.

1.2. Objectif

L'objectif de ce travail de thèse est de définir une approche intégrée de modélisation capable de gérer la représentation géométrique de l'édifice tout au long de son histoire. Il s'agit donc d'acquérir des informations sur la morphologie de l'édifice à différentes époques à partir du relevé de terrain, de campagnes photographiques et de sources historiques, puis de restituer en fonction des données toutes les époques (celle actuelle et celles passées), et enfin enrichir les restitutions en fonction de l'objectif de la représentation. Pour répondre à cette problématique, il faut d'une part, structurer la description de l'édifice (représentation des éléments architecturaux qui le composent) par rapport à une lecture sémantique du bâti, et d'autre part être capable de gérer cette structuration en fonction du temps. Suite à une phase de recherches bibliographiques sur les modèles spatio-temporels et sur les approches de restitution capables de décrire les informations historiques, l'approche est construite de la manière suivante.

Concernant la dimension spatiale, ce travail se situe en continuité avec la thèse de doctorat de Livio De Luca (De Luca 2006) portant sur la définition d'une approche hybride de reconstruction tridimensionnelle d'édifices patrimoniaux. Cette approche permet de définir et de décrire les relations spatiales entre les entités qui composent un ensemble architectural. Quant à la dimension temporelle, il s'agira de définir une méthode adaptée à la description des transformations des édifices, qui prenne en compte leurs changements (qui peuvent être plus ou moins bien définis) et leurs modifications spatiales (de plus ou moins grande amplitude). Afin de structurer d'un point de vue spatial et temporel la maquette, l'approche se composera de trois phases imbriquées.

En ce qui concerne **la restitution 3D des états historiques**, cette approche s'appuie sur différents moyens d'acquisition de données ayant un niveau de fiabilité et de précision métrique très diversifiés, tels que le relevé laser, l'acquisition photographique, et des sources iconographiques plus datées (photos historiques, dessins en projection perspective, en projection axonométrique ou en pseudo perspective). L'étape de modélisation géométrique se basera sur la restitution de chaque état historique par comparaison avec l'état déjà restitué et les sources iconographiques. Il s'agira donc, à partir de l'analyse des sources, d'isoler les éléments géométriques et de définir des procédures de modélisation.

En ce qui concerne la **structuration spatio-temporelle de la maquette**, cette approche se base sur la structuration de la maquette 3D et sur sa transformation en outil de représentation de connaissances. De ce fait, dans cette phase sont mis au point des outils de structuration temporelle permettant de qualifier le type de transformation subie. De tels outils, d'une part sont appliqués à toutes maquettes structurées sémantiquement en fonction d'un point de vue préétabli, et d'autre part

sont employés par comparaison de la maquette avec les sources iconographiques. Finalement, dans cette phase sont affectés divers attributs : les attributs caractérisant les éléments géométriques d'un point de vue spatial et temporel, ceux qui établissent les relations réciproques entre les entités transformées, et enfin les attributs qualifiant un niveau de fiabilité de la restitution.

Pour l'étape de **représentation des connaissances**, l'approche doit assurer la structuration correcte en éléments et sous éléments, qui prenne en compte la structuration temporelle et les relations réciproques afin de pouvoir consulter la maquette et isoler les informations désirées. Il s'agira donc non seulement de sauvegarder les sources et les restitutions géométriques, mais aussi les attributs qualifiant les entités et leurs relations réciproques. Cette méthode met en évidence deux aspects. Premièrement, ce modèle permettra d'apporter des représentations géométriques multiples en fonction de l'objectif de l'analyse, qui peut concerner l'ancienneté de la morphologie, la qualification de la maquette comme certaine ou hypothétique, et les incertitudes liées à la restitution. Deuxièmement, le modèle permettra d'afficher l'évolution au fil du temps, l'état actuel et les états passés, les éléments disparus ou transformés, et la nature des transformations. Dans ce sens, diverses résolutions géométriques en fonction des sources utilisées pour la restitution seront prises en compte par le modèle.

1.3. Portée, limites, apports principaux

Ce sujet se situe dans le cadre de la prise en compte des évolutions spatio-temporelles d'édifices historiques patrimoniaux. Compte tenu de la problématique très vaste, nous concentrerons notre attention sur les transformations auxquelles les édifices historiques sont sujets. Tout particulièrement, notre intérêt porte sur la restitution des époques passées et sur les types de sources conditionnant ces restitutions. L'apport de cette thèse est donc premièrement d'avoir défini les phases du processus de restitution et de structuration de données patrimoniales en fonction de la notion temporelle (grâce aux sources iconographiques) et deuxièmement d'avoir joint au modèle de description de l'édifice un système de notation conceptuelle des transformations du bâti. En conséquence, ce document est organisé en trois parties présentant premièrement la représentation des informations historiques, deuxièmement l'approche proposée et les apports informatiques pour la gestion des informations patrimoniales, et enfin la structuration d'informations temporelles autour de la maquette.

1.4. Terrain d'expérimentation

Comme la problématique concernant la restitution du patrimoine à partir des sources est très complexe, la palette d'étude sera réduite à l'échelle de l'édifice. Les travaux développés ont été validés sur trois terrains d'expérimentation choisis parmi les expériences de relevé et de représentation numérique menées au sein du laboratoire MAP-Modèles et simulations pour l'Architecture, l'urbanisme et le Paysage : la Cour d'Honneur de la Sorbonne à Paris, le Château Comtal de Carcassonne et le Trophée des Alpes sur le site de la Turbie. Le choix de sites multiples répond à l'exigence de confronter l'approche avec trois facteurs essentiels à l'analyse.

Premièrement, les **arcs temporels** différents méritent une attention particulière car ils permettent de vérifier la portée et la représentation des changements. L'histoire de ces trois complexes d'édifices est marquée par plusieurs grandes périodes : dans la Cour de la Sorbonne, trois états (l'état Sorbon, l'état Richelieu et l'état actuel) se sont déroulés en 400 ans ; pour le Château Comtal huit grands états se sont succédés en 800 ans environ ; en revanche trois grandes étapes ont marquées le Trophée des Alpes durant une période de 2000 ans environ.

Deuxièmement, il est fondamental de prendre en compte plusieurs **types de transformations**. Chacun de ces trois sites révèle des dynamiques de transformation variées et parfois uniques : à titre d'exemple, parmi les transformations que le Trophée a subi, ce site, qui à l'origine n'avait aucune vocation militaire, a changé de fonction et il a été transformé en forteresse; ensuite, certains de ses éléments ont été remis en place au début du XXe siècle. Également, les édifices de la Cour de la Sorbonne sont caractérisés entre autre par des reconstructions. En revanche, le site de Carcassonne a révélé des modifications à une plus petite échelle, telles que l'union et la division.

Enfin, nous voulions confronter l'approche à un **corpus documentaire** le plus varié possible. Les informations dont l'on dispose sur ces ensembles architecturaux sont très hétérogènes : elles comprennent une variété de sources historiques (gravures, textes, plans, photographies historiques), une documentation vectorielle (plans, coupes de face, vues de face), et un nuage de points de l'état issu d'un balayage laser 3D. Ces trois lieux, si riches et divers par leur histoire, ont permis d'une part d'illustrer les différentes dimensions de changements qu'un édifice peut subir, d'autre part, de valider notre approche innovante de restitution.

1.5. Structure du document

Le document est structuré de la façon suivante. Les deux premiers chapitres définissent la problématique et l'état de l'art concernant la représentation des informations historiques. Tout particulièrement, le chapitre 2 décrit les approches actuelles de modélisation géométrique des états passés, et le chapitre 3 présente un panorama des modèles de représentation des transformations historiques. Sur la base des préoccupations retenues, dans le chapitre 4 sont présentés les deux modèles proposés pour la structuration spatiale/temporelle et l'architecture globale de l'approche.

Dans le chapitre 5 est décrit l'outil de restitution des états passés, qui se base sur une démarche en trois étapes imbriquées : la phase de restitution géométrique des états passés, la méthode de structuration spatiale en fonction du temps, et enfin, l'enrichissement de la maquette. Ce dernier est possible à travers la définition d'attributs spatiaux, temporels et de qualification de la maquette.

Le chapitre 6 décrit l'outil de représentation des transformations temporelles. Dans ce chapitre, est présenté en premier un état de l'art des systèmes qui ont comme objectif la visualisation des évolutions. Cette analyse permet de fixer les critères retenus pour la consultation des transformations historiques dans un système de visualisation d'informations. Enfin, dans le dernier chapitre sont définies les limites et sont posées les perspectives de recherches futures.

2. Restitution des états passés

Si l'état actuel d'un édifice offre une riche collecte de données spatiales qui permet de produire des maquettes virtuelles « éloquentes » et riches en détails, les états passés sont caractérisés par des propriétés spatiales et temporelles incertaines parce qu'ils sont connus grâce à des sources iconographiques et documentaires très variées, parfois imprécises et de fiabilité incertaine. Dans ce sens, la restitution géométrique peut résulter complexe, car quelquefois il est difficile d'établir la morphologie précise de l'artefact ou sa position originare dans l'espace à partir des sources, d'autres fois il est impossible de déterminer sa datation précise.

Conscient qu'il y a un véritable manque dans la communauté scientifique, on essaye de s'intéresser au problème d'une restitution cohérente des états historiques. Ce chapitre est structuré de la façon suivante : d'abord nous expliquons la problématique des informations véhiculées par les sources ; ensuite nous faisons un état de l'art des approches actuelles de représentation des états historiques. Les expériences illustrées dans cet état de l'art conduisent à la fois à une analyse critique des facteurs conditionnant la description des époques passées et à la définition des véritables paramètres qui doivent être pris en compte.

2.1. Problématique

Plus on remonte dans le passé, moins les sources suffisent à fournir des informations exhaustives sur la morphologie et le cycle de vie du bâtiment. Les sources iconographiques étant très hétérogènes, des problématiques d'interprétation s'ouvrent au niveau spatial (sur la forme et la position) et au niveau temporel (quelle période de construction et démolition, et quel cycle de vie caractérise un édifice). Dans ce paragraphe, nous allons d'une part détailler les typologies des sources et d'autre part caractériser leur niveau fiabilité. Enfin, nous abordons la problématique de la formulation d'hypothèses de restitutions.

2.1.1. La collecte iconographique

A différence d'autres domaines où une collecte systématique d'informations permet d'effectuer des bilans statistiques, de créer des catégorisations ou de prendre des décisions, en patrimoine historique les informations sur les artefacts sont transmises de façon fortuite, grâce aux sources possédées ou découvertes. Les sources historiques et documentaires d'un site, par leur nature, peuvent être très hétérogènes par typologie et qualité de l'information communiquée. Leur typologies sont détaillés comme suivre.

Reliefs descriptifs. Les sculptures qui présentent un très faible relief sont souvent porteuses d'informations précieuses. Dans cette catégorie rentrent les médaillons, les sceaux, les bas-reliefs, mais aussi les gravures préhistoriques.

Dessins. Ils incluent diverses représentations. Les *croquis* sont des dessins faits très rapidement, sans recherche de détails. Leur objectif est celui de donner un aperçu d'un élément afin de *noter* des aspects, ou d'être un support explicatif à la communication. Les *esquisses* sont des dessins rapides qui anticipent une œuvre plus sophistiquée, complexe et enrichie en détails, comme par exemple des *peintures*. Les *gravures et les estampes*, obtenues respectivement en incisant un matériau ou en faisant une impression ou un dessin sur un support, communiquent une richesse de détail plus élevée.

Photographies. Cette catégorie inclue les photos historiques et actuelles, les photos stéréoscopiques, les mosaïques de photos et les orthophotos. Généralement les photos historiques peuvent être abimées au cours du temps ou manquent parfois de netteté ; toutefois, elles peuvent témoigner les états passés disparus d'un artefact. Les photos peuvent être exploitées en diverses façons : la combinaison de blocs de photos parallèles permet la génération de photos orthogonales à résolution élevée (orthophotos terrestres et aériennes) ; les blocs de photos convergentes et de photos stéréoscopiques (vues légèrement décalées d'une scène) permettent l'extraction des coordonnées spatiales pour reconstruire un modèle tridimensionnel par calibration des points correspondants.

Documentation métrique. Elle est constituée par toutes représentations orthogonales de l'espace géographique, à la main ou vectorielles¹, à échelle variée, dont l'objectif est de fournir les rapports et les proportions entre les diverses parties. A cette catégorie appartiennent *plans historiques, cadastres, plans urbains, coupes et vues de faces*.

Relevé. Ce processus, dont l'objectif est de mesurer les objets, utilise des techniques très variées : le relevé traditionnel (à la main), basé sur la détection de points fondamentaux appartenant à des triangles, le relevé par télémètre, basé sur l'utilisation d'un appareil optique pour mesurer la distance d'un objet visé ; le relevé issue du balayage laser, qui relève des milliers de coordonnées spatiales.

¹ Image numérique composée de primitives géométriques individuelles (segments de droite, polygones, arcs de cercle, etc.) définies chacune par divers attributs de forme, de position, de couleur. L'avantage d'une représentation vectorielle est l'utilisation de couches de dessin permettant d'isoler divers concepts, traits.

Modèle. Il est une représentation capable de décrire les caractéristiques conceptuelles, physiques ou structurelles d'un objet. Dans le passé le modèle physique anticipait ce qui était ensuite construit. Suite au développement de la CAO, le modèle numérique substitue partiellement le modèle physique qui au contraire est utilisé dans les étapes finales de validation d'un produit avant la mise sur le marché (techniques de prototypage rapide).

Multimédia. Les techniques par ordinateur fournissent aujourd'hui des nouvelles sources multimédia, incluant les vidéos, les animations, les rendus, les maquettes, toute sorte des sources produites par ordinateur. D'une part les vidéos et les animations permettent d'explicitier la documentation temporelle ; d'autre part les

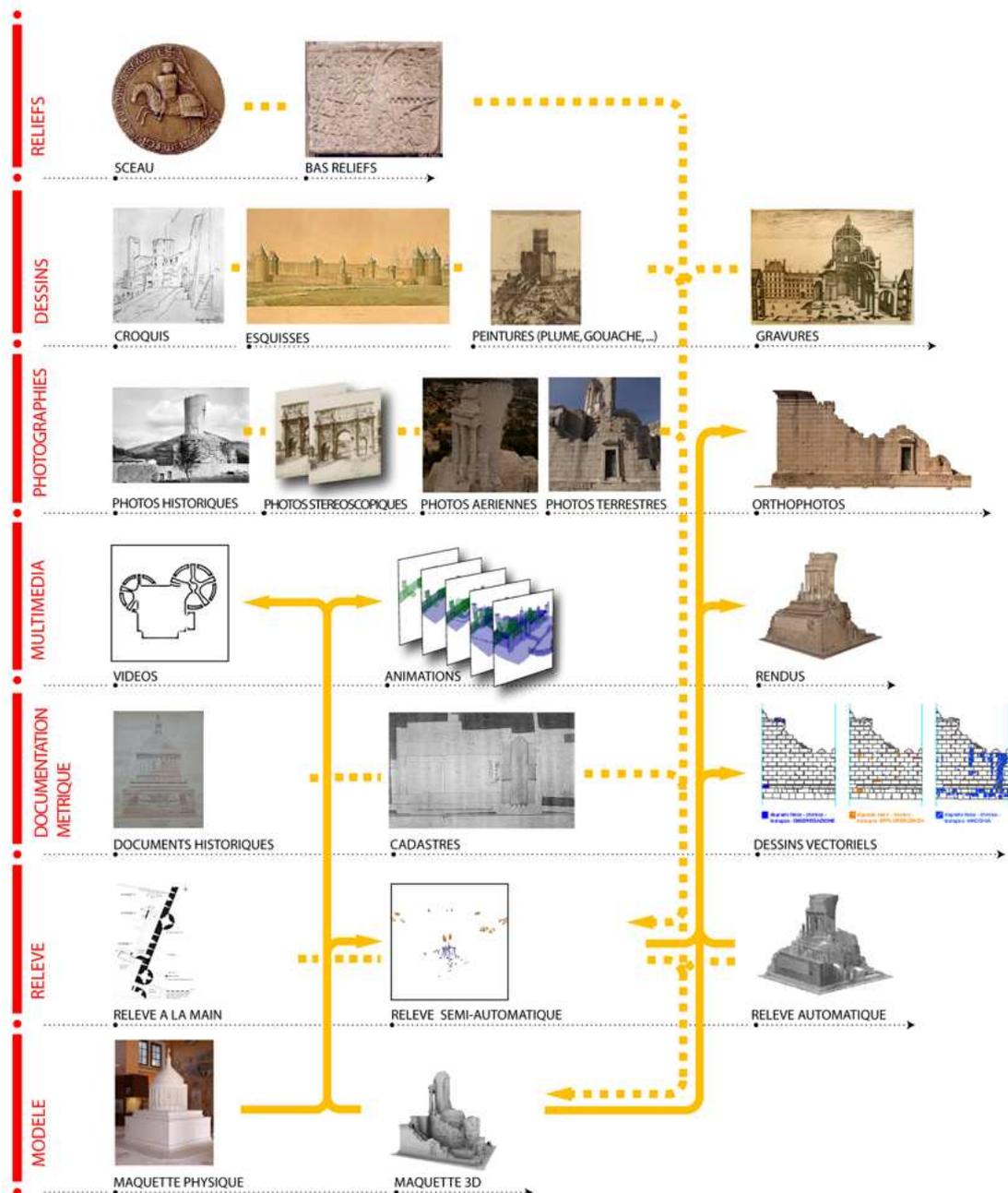


Figure 1. Synthèse des sources documentaires graphiques permettant de documenter un site historique. Les traits pointillés mettent en relation les sources bidimensionnelles à partir desquelles un modèle 3D peut être reconstitué. Inversement, les traits jaunes continus indiquent les sources graphiques bidimensionnelles qui peuvent être produites à partir d'un modèle 3D.

rendus explicitent le volume et parfois la qualité métrique.

Selon l'objectif de la représentation, les sources peuvent être classées en deux catégories :

- les *sources graphiques visuelles* (esquisses, croquis, dessins, photos historiques, orthophotos, vidéos) apportent des aspects qualitatifs et donc sont plutôt adaptés pour représenter la volumétrie et la texture ;
- les *sources graphiques métriques* (dessins techniques, relevés à la main, semi-automatique, par télémétrie, par balayage laser) décrivent les surfaces et les coordonnées spatiales.

La liste de sources décrites en Figure 1 met en évidence deux aspects. Le premier aspect concerne le rôle de la maquette. La maquette numérique a trois rôles distincts. Premièrement elle est un modèle, créé à partir de sources (historiques et actuelles) et descripteur de qualités physiques et métriques. Deuxièmement, elle peut constituer un outil pour extraire des mesures (à partir des photos, du relevé automatique ou semi-automatique) et des nouvelles sources (photographies redressées, vidéos, animations, dessins vectoriels ou encore des rendus). Enfin, la maquette numérique peut être considérée comme une source documentaire. Si dans le passé le dessin manuel apportait une certaine qualité visuelle et métrique en fonction de l'objectif de la représentation, aujourd'hui les nouvelles techniques digitales se substituent au dessin manuel et deviennent le moyen pour représenter, documenter, comprendre le patrimoine historique. Le deuxième aspect concerne la temporalité. Généralement, les sources en elles mêmes n'explicitent pas l'aspect temporel. L'homme a une perception du présent qui le guide à documenter les éléments aperçus en tant que présent. Seulement les techniques multimédias (vidéos et animations) permettent d'explicitier la dimension temporelle. Toutefois, parfois l'évolution d'un site peut être éclaircie grâce à la collecte de sources qui sont parvenues jusqu'à nos jours.

2.1.2. La fiabilité des sources

Dans des domaines variés, diverses études sur la perception² de l'incertitude ont été amenées afin d'évaluer les paramètres qui en conditionnent la présence, afin d'interagir avec elle et la rendre un support pour la prise de décisions (MacEachren et al. 2005; Thomson et al. 2005). (Pang et al. 1997) parle d'incertitude à trois niveaux : dans le processus d'acquisition, d'analyse et de visualisation des données. En patrimoine historique, les facteurs d'incertitude d'une source sont liées à trois aspects : la qualité, la cohérence et l'objectivité. (Thomson et al. 2005) propose une classification plus détaillée de ces aspects basée sur 9 sous-catégories. On s'appuie sur cette classification pour décrire l'incertitude en patrimoine historique. Pour chaque catégorie, des exemples concrets d'application sont proposés.

² Du point de vue des facteurs humains, (Gershon 1998) explique l'incertitude comme une partie de connaissance imparfaite et présente six types de causes : les informations incomplètes, l'incohérence, les informations trop compliquées, l'incertitude, la présentation imparfaite et les données corrompues

1. Fidélité/erreur : différence entre l'observation et la réalité.
2. Précision : exactitude de mesure/estimation, dérivée de paramètres de mesure, des dispositifs d'estimation, et/ou de procédures. L'impossibilité de donner une mesure estimée de façon arbitraire implique une approximation de l'information par rapport à la forme, à la position spatiale ou à la datation d'un artefact.
3. Intégralité : mesure dans laquelle l'information est complète. Une *manque d'information* définit donc l'absence totale d'information qui rend impossible une quelconque mensuration.
4. Cohérence : limite à partir de laquelle les composantes de l'information concordent.
5. Filiation : conduit par lequel l'information est passée.
6. Pertinence/distance temporelle : actualité de la collecte d'informations en fonction du laps de temps et du contexte.
7. Crédibilité : évaluation des sources d'information.
8. Objectivité/subjectivité : montant du jugement inclus.
9. Interdépendance : rapport entre plusieurs sources, permettant d'évaluer

Facteurs de certitude	Exemples spatiales	Exemples temporels								
			Documents	Reliefs	Dessins	Photos	Multimédia	Documentation métrique	Relevé	
1. Fidélité/erreur	Coordonnées spatiales	+/- 1 jour Erreur du au Carbone 14	QUALITE							
2. Précision	Granularité spatiale	Granularité temporelle								
3. Intégralité	% de couverture de surfaces par balayage	Quantité d'années connues sur un arc temporel plus vaste								
4. Cohérence	des archéologues estiment la dimension originare à une certaine valeur, d'autres experts en estiment une autre	des sources se réfèrent à une période temporelle, d'autres sources en indiquent une autre	COHERENCE							
5. Filiation	une source affiche un édifice qui en réalité est encore en cours d'exécution	dans une source il y a une référence à un bâtiment construit avant								
6. Pertinence / actualité de la source	datation d'une carte géographique	C = T présent - T information ; prévisions futures de fin de projet en conception, restauration, fouilles datation d'une carte géographique								
7. Crédibilité	référencement spatiale par GPS ; description de la texture d'un artefact par un amateur	Métadonnées temporelles d'une photo ; description de la période de création d'un artefact par un amateur	OBJECTIVITE							
8. Objectivité	Local ; étranger	Expert du domaine ; apprenti								
9. Interdépendance / rapport	Source qui se base sur une autre d'un acteur différent	Source qui renvoie à une autre plus datée								

Figure 2. Rapport entre les sources et les incertitudes : évaluation de la qualité des informations offertes par les sources.

l'authenticité d'un fait.

De façon générale, il est impossible de définir un ordre absolu de fiabilité des sources. Trop de paramètres rentrent en jeu pour des sources ayant des objectifs trop variés. On peut affirmer que le niveau de certitude augmente en fonction de la richesse d'informations métriques et visuelles de chaque source ; mais l'évaluation réelle du niveau de certitude / incertitude doit être établie cas par cas, selon la spécificité de chaque source. De ce fait, le niveau de précision, de cohérence et l'objectivité est plus élevé pour les sources les plus riches en détails métriques, visuels ou descriptifs. Les sources sont donc ordonnées selon leur apport métrique et visuel croissant (des sources les plus imprécises aux sources les plus détaillées). Par exemple, une source de faible niveau métrique comme une gravure, peut fournir plus de détails qu'une photo historique abîmée. Par conséquent, les sources sont affectées d'un niveau de

FIABILITE DE SOURCES



Figure 3. Divers types d'incertitude (spatiale et temporelle) résumant la classification de Thomson et appliqués à l'architecture historique.

certitude ou incertitude qui dérive de divers aspects.

Telles catégories peuvent être détaillées pour les aspects spatiaux et temporels qui conditionnent le patrimoine historique. On fournit quelques exemples d'incertitude au niveau spatial et/ou temporel.

- *Fidélité/Erreur [1]*. Au niveau spatial, un relevé contient des erreurs métriques plus ou moins importants, selon l'outil technique utilisé. Comme le montre la Figure 3 (cas 1.1.), le niveau de fiabilité est plus important si le relevé est fait à l'aide du scanner laser. La superposition entre un relevé traditionnel et les profils extraits du nuage de points peut montrer des écarts qui ne sont pas négligeables. Par exemple, au niveau temporel, toute interprétation archéologique révèle des problèmes de datation des fouilles. La plupart de fois on recourt à des systèmes de datation incertains comme celui par le carbone 14, où l'erreur peut s'approcher jusqu'à neuf siècles.
- *Précision [2]*. Parmi les causes d'indétermination spatiale, les sources offrent des niveaux de précision morphologique variés (*granularité spatiale*). Cet aspect concerne la forme, la position et l'apparence visuelle de l'artefact. A titre d'exemple, un esquisse de V. Le Duc est moins riche en détails d'une orthophoto à résolution élevée (Figure 3, cas 1.3). Au niveau temporel, la notion de granularité provoque une importante ambiguïté *technique* : événements qui se sont passés « en octobre 1650 » ou « entre l'an 1801 et le 1830 » ou encore « le 10 août 1810 » certifient des poids temporels différents. Or, si la granularité est celle du mois, on ne peut pas établir dans quel jour la transformation a eu lieu : des transformations de différentes granularités doivent être gérées.
- *Intégralité [3]*. Parfois la forme de l'édifice et les techniques de relevé empêchent une acquisition totale d'informations : à titre d'exemple, le nuage de points issu du scanner laser peut avoir des zones d'ombre dus au positionnement au sol de l'appareil de relevé. La forme de l'édifice peut donc résulter incomplète. De même, au niveau temporel, la connaissance d'un site peut être partielle : quand par exemple avant une certaine période temporelle on ne dispose pas d'informations sur le site.
- *Cohérence [4]*. A titre d'exemple de contradiction spatiale, la gravure en Figure 3 (cas 2.1.) montre sur l'aile Est de la cour de la Sorbonne quatre fenêtres sur le sommet du bâtiment central mais les photos historiques du même bâtiment montrent un ensemble de trois fenêtres seulement. Ces deux sources sont contradictoires et, si les informations s'y limitent, il n'est pas possible de connaître les vraies transformations que le bâtiment a subi pendant sa vie. De même, au niveau temporel, parfois plusieurs sources classifient le même événement à des moments temporels différents. De plus, divers experts peuvent supposer un artefact à des époques temporelles contradictoires.
- *Filiation [5]*. Une source graphique représente un élément qui s'inspire morphologiquement d'un autre de part sa typologie. Les peintures de la renaissance souvent utilisent cet expédient pour représenter des édifices en cours de construction ou pas encore réalisés.

- *Incertitude dans le futur [6]*. Ce type d'incertitude est présent quand il est nécessaire de faire des prévisions. La planification de déplacement physique d'un élément architectural dans différents musées, la prévision de restauration des fresques, de fin d'un projet ou encore la planification des fouilles constitue des exemples.
- *Crédibilité [7]*. La certitude sur une époque varie en fonction de la source. Au moment de prise d'une photo, des métadonnées décrivent la date de prise. En revanche, quand un amateur estime la période temporelle d'un artefact, sa crédibilité est moins élevée.

2.1.3. L'interprétation des sources

Quand l'on étudie des bâtiments historiques, les informations qui concernent ses états antérieurs sont souvent contradictoires, hétérogènes, incertaines et incomplètes. Chaque source est caractérisée par une certaine *qualité*, une *cohérence* et un niveau d'*objectivité*. Ces trois aspects dépendent d'une composante humaine et des moyennes physiques qui ont permis de représenter l'objet (Stefani 2006).

- *La qualité de la source* dépend de son état de conservation, des outils de représentation employés et de l'objectif de la description. Premièrement, souvent la qualité graphique des sources n'est pas très élevée pour tirer des informations sur les proportions. Deuxièmement, dès que l'on a des informations métriques sur un objet, le niveau de fiabilité augmente immédiatement. Troisièmement, le niveau de fiabilité augmente encore plus si l'on analyse un relevé fait à l'aide du scanner laser.
- *Le niveau de cohérence* dépend de la concordance des informations véhiculées par les sources. Il s'appuie sur la comparaison avec diverses sources.
- *Le niveau d'objectivité* est lié à l'auteur de la source, car souvent il transfère graphiquement son propre point de vue par rapport à son contexte de vie, ou parfois il représente des architectures selon un projet pas encore réalisé.

Le passé étant inaccessible, si les sources offrent des informations incomplètes sur la morphologie d'un artefact, les experts sont amenés à interpréter la forme et à formuler des hypothèses parfois très variées sur les états passés. De plus, la comparaison des sources peut induire à des raisonnements contradictoires et à des hypothèses qui précisent le sens d'incertitude sur la *forme*, la *position* et la *datation* des artefacts. Les hypothèses sont un cas particulier d'interprétation des incertitudes appliquée à l'architecture. Plus précisément, les historiens et les archéologues s'appuient sur différents raisonnements pour formuler leurs hypothèses (Strothotte et al. 1999) :

- *déduction*. Ce type d'interprétation se base sur la détermination des formes architecturales à partir d'éléments géométriques incomplets mais pour lesquelles la géométrie est reconnaissable (fouilles archéologiques ou sources iconographiques).

- *analogie*. L'historique d'un lieu peut être supposé à partir de la documentation sur les techniques de l'époque. Le processus d'analogie s'appuie sur les connaissances architecturales telles que les traités classiques d'architecture, les relations de composition, la connaissance de constructions similaires pendant la même époque, ou encore de constructions similaires en proximité du site.

Chaque perte d'information ouvre plusieurs possibilités d'interprétation. Les restitutions hypothétiques sont donc des *versions* possibles, proches aux versions des produits d'un processus de conception. Les hypothèses peuvent enfin être validées ou démenties selon leur niveau de confiance et le processus d'interprétation des experts. La plupart des restitutions des états passés s'appuient conjointement sur ces types de raisonnements comme support à la définition morphologique des éléments architecturaux.

2.2. Etat de l'art des approches pour la représentation des états passés

La pratique de représenter l'architecture passée n'est pas une démarche contemporaine. Ses origines remontent à l'époque romaine. Vitruve au I^{er} siècle av. J.-C. ou Palladio au XVI^e siècle ont décrit l'architecture dans deux fameux traités (Palladio 1992; Perrault 1684). Entre le 1541 et le 1549, Palladio se déplaçait des nombreuses fois à Rome pour effectuer des relevés des bâtiments romains. Aujourd'hui on peut lire des traces de ses raisonnements dans ses esquisses (Figure 4). Il y a 500 ans Palladio commençait à interpréter les fouilles et à représenter l'architecture d'une époque précédente à la sienne dans le but de la comprendre et de la réutiliser en clé moderne dans ses bâtiments. Ses esquisses sont une première opération de *représentation de l'architecture*. Comme J.P. Saint Aubin écrit, « cette appellation regroupe tous les documents qui se proposent de montrer l'architecture ». Elle est une « grande ambition de faciliter la compréhension d'un processus créatif parmi le plus complexes » (Saint-Aubin 2000).

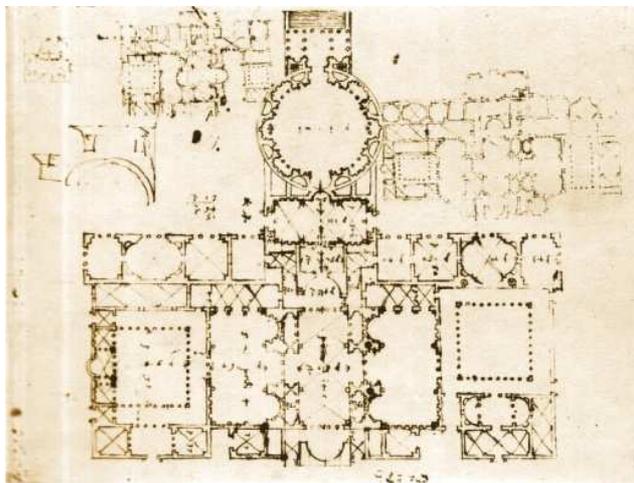


Figure 4. Andrea Palladio, Thermes d' Agrippa et Panthéon, RIBA, Londres, Vol. VII, fol. 2.

Aujourd'hui l'outil informatique offre un support essentiel à la visualisation des états passés des édifices. Non seulement la géométrie peut avoir un niveau de détail très élevé que nous pousse à obtenir des formes particulièrement riches et complexes, mais chaque géométrie peut correspondre à un état temporel précis. Toutefois, par rapport à la restitution de l'état actuel, la représentation des états passés est plus laborieuse : en effet l'acquisition et le traitement des données spatiales sont plus limités parce que les informations dont on dispose sont moins connues et moins

fiables. De ce fait, si l'état actuel permet des objectifs de restitution s'appuyant sur la géométrie connue de l'artefact (tels que la précision géométrique du modèle, la description d'aspects spécifiques ou la restitution de l'apparence visuelle), la simple restitution géométrique des états passés, étant basée sur des sources très variées, peut être une tâche complexe. Cette partie d'état de l'art vise donc à classifier les approches actuelles de représentation 3D des états historiques concernant le cas d'édifices patrimoniaux en fonction des divers objectifs de description temporelle. La représentation des états passés tend à investiguer la forme de l'artefact, sa position et son apparence visuelle. Dans ce sens, ce paragraphe illustre différentes expériences regroupées en cinq catégories principales d'approches, classées selon l'objectif de représentation, visant à la représentation des états passés des édifices :

- Approches qui visent à représenter l'apparence visuelle des états passés ;
- Approches qui visent à décrire le contexte topographique des états passés ;
- Approches qui visent à décrire la morphologie des états passés ;
- Approches qui visent à représenter les évolutions historiques ;
- Approches qui visent à représenter les incertitudes.

L'objectif de la représentation conditionne de façon significative, d'une part, la méthodologie utilisée pour le traitement de données spatiales, et d'autre part, la stratégie de représentation choisie. En fonction de l'approche adoptée, nous distinguons différents traitements de données qui impliquent des structurations plus ou moins complexes du modèle. De ce fait, pour chaque approche, des considérations sur les techniques d'acquisition et sur la structuration du modèle seront abordées et feront partie des préoccupations retenues dans le chapitre 4.

2.2.1. Approches qui visent à représenter l'apparence visuelle des états

Ce genre d'approches vise à représenter l'édifice, un complexe d'édifices ou des villes entières, afin de restituer l'idée d'ensemble de leur état historique. Dans ce genre de travaux (Serrato-Combe 2001; Snyder & Paley 2001; Fischer 2005; Bustany-Leca & Bustany 2005), les restitutions historiques sont bien insérées dans leur contexte géographique, toutefois elles sont représentées avec les mêmes critères

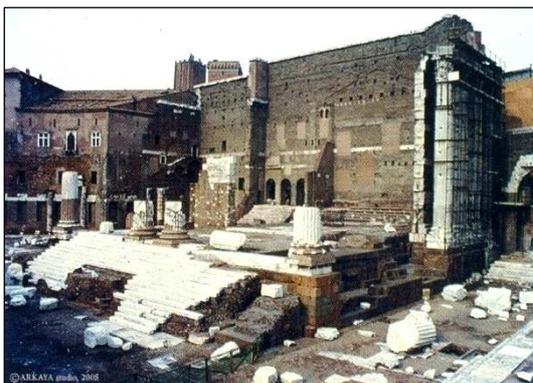


Figure 5. A gauche, vestiges du temple de Mars Ultor à Rome; à droite, restitution tridimensionnelle du même temple. Arkaya, 2005.

visuels que les éléments existants. Elles proposent des restitutions des états passés ayant un niveau de détail plus élevé que les informations réellement connues. La Figure 5 en offre un exemple : le temple de Mars Ultor à Rome est une restitution d'un état passé mais aucune différenciation n'est faite en comparaison avec les vestiges de ce temple. Le résultat est un ensemble d'images photo - réalistes (Strothotte et al. 1999) qui nous montre un site historique qui n'existe plus. Cette tendance est à la base d'une volonté de s'approcher à l'aspect ancien du site, pour rendre un site tel qu'on l'imagine. Les objectifs de ces genre de restitutions sont de deux ordres : premièrement de faire preuve à l'utilisateur de l'accessibilité du monde virtuel et deuxièmement de rendre l'expérience plus immédiate, « vraie » et convaincante.

2.2.2. Approches qui visent à décrire le contexte topographique

Ces recherches proposent des restitutions d'architectures passées souvent dévastées. La restitution est effectuée à partir des formes relevées par acquisition laser et/ou photogrammétrique (Cariou 2005; Lecocq 2003; Sideris & Roussou 2002; Losier et al. 2007), soit à partir de documents anciens (Stojakovic & Tepavcevic 2009). Ces travaux visent à élaborer des simulations topographiques des modèles *théoriques* d'édifices dans le but d'approfondir la recherche scientifique. Pour faire cela, (Cariou 2005) par exemple propose des maquettes *neutres* des temples du forum romain (à la période du IIIe-IVe siècle) parfaitement intégrés dans le cadre urbain. Les vestiges *in situ* sont donc différenciés grâce à l'application de textures par rapport aux restitutions hypothétiques. La confrontation du modèle informatique à la topographie du lieu permet d'arriver à des constats intéressants sur les dimensions supposées des éléments architecturaux : la visualisation d'une ou plusieurs interprétations permet de vérifier la justesse des restitutions ou des propositions hypothétiques qui sont effectuées sur la base des interprétations sur les éléments existants et par analogie avec d'autres artefacts.



Figure 6. A gauche, photo du temple de Vespasien dans le forum romain, à droite, restitution 3D du même temple (Cariou 2005).

2.2.3. Approches qui visent à décrire la morphologie

Les approches de restitution morphologique des états passés sont très variées et dépendent des informations dont on dispose. Certaines approches s'appuient sur l'acquisition de données de terrain du peu d'éléments subsistants (par relevé laser et/ou par campagne photographique) afin d'effectuer la restitution géométrique des

éléments manquants par *déduction* et par *comparaison* avec des sources iconographiques anciennes. En revanche, la reconstruction tridimensionnelle des éléments architecturaux disparus est un défi et ouvre des panoramas de modélisation très variés qui ont été sujets de plusieurs recherches (Criminisi et al. 2000; S.F. El-Hakim 2001; Koshak & Gross 1998). La disparition des objets oblige à s'appuyer sur les sources documentaires datées telles que les photographies historiques, les documents historiques, les peintures en perspective, les fresques, ou encore des dessins. Parfois, même lorsque des images multiples sont possibles, certaines parties de la scène apparaissent dans une seule image en raison de l'occlusion et / ou manque de repères correspondants entre les images. Certaines approches permettent une reconstruction 3D à partir d'une seule image, en s'appuyant sur les lignes et les points de fuite, comme il est démontré par (Criminisi et al. 2000; Debevec et al. 1996).

(S.F. El-Hakim 2001) propose une méthode précise et souple basée sur des principes de photogrammétrie pour modéliser une grande variété de sites historiques. Cette approche permet de reconstruire en 3D de nombreuses structures détruites à l'aide de vieilles photographies et de peintures et cartes postales. L'approche n'a pas besoin de modèles d'objets, ni de connaître les paramètres internes de la caméra. De plus il n'utilise pas les lignes ou les points de fuite, qui peuvent être absents ou difficiles à extraire. Cette méthode exploite plusieurs types de contraintes : contraintes de points, de coordonnées, de surfaces et topologiques. Cette approche premièrement, dans l'étape de calibration, trouve les paramètres internes et externes de la caméra en utilisant un ensemble de contraintes ; deuxièmement, pour l'étape de restitution, l'approche utilise des contraintes supplémentaires pour obtenir des coordonnées 3D pour la reconstruction. Les paramètres de l'appareil photo et les coordonnées 3D sont calculés à partir d'ajustement des faisceaux photogrammétriques qui consiste en une triangulation simultanée de toutes les données. Dans la phase de reconstruction, plus de contraintes sont combinées avec les équations de calibration.

Ces contraintes incluent, d'une part, des formes (telles que plans, cylindres, parallélépipèdes, sphères et cercles), et d'autre part, des relations topologiques (telles que perpendicularité, parallélisme et symétrie). Pour les vieilles fresques ou les peintures avec la perspective erronée, la méthode (Sabry F. El-Hakim et al. 2008) impose qu'une partie de l'objet ou le site existe toujours, par exemple, ses fondations ou les vestiges archéologiques. Des mesures à partir de ces restes sont utilisées pour re-échantillonner les matériaux de base, afin de créer une image avec une perspective correcte, et l'utiliser pour reconstruire le site. Dans ce genre d'approches, le résultat est un modèle non structuré et indépendant pour chaque type de données : la restitution géométrique n'est pas structurée.

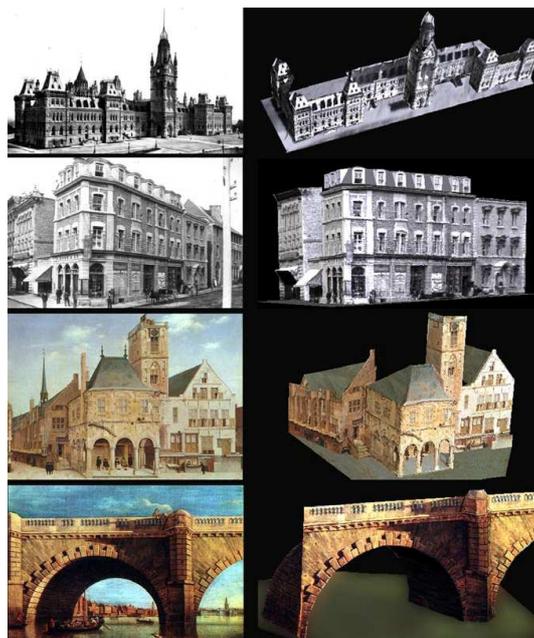


Figure 7. Reconstructions 3D à partir de peintures et photos anciennes (El-Hakim 2001).

2.2.4. Approches qui visent à représenter les évolutions

Par rapport aux systèmes décrits auparavant, d'autres travaux sont axés sur la représentation de plusieurs états historiques. La nécessité de visualiser les divers états historiques ouvre des perspectives de recherches très variées. D'une part, certaines approches (Spallone 2005; Bernard 2007) visent à mettre en évidence les évolutions des sites. L'évolution historique de l'église de San Pietro, (Asti), est identifiée en 5 étapes historiques qui se sont déroulées entre le XII^e et le XX^e siècle. Les transformations morphologiques subies sont signalées par des codes de couleurs qui soulignent les apports (les modifications) à chaque étape. Même si ce genre de restitutions permet des questionnements sur la démolition et la reconstruction de certaines parties de la morphologie, il ne permet pas une véritable comparaison des évolutions.

D'autres systèmes permettent d'afficher les évolutions et de formuler des requêtes pour isoler les différentes restitutions géométriques des époques historiques qui sont contenues dans une base de données (Carrozzino et al. 2009; SanJosé-Alonso et al. 2009; Hetherington et al. 2006; Sabry F. El-Hakim et al. 2008). Vergauwen intègre aux scénarios concernant les états historiques des photos aériennes (Vergauwen et al. 2004). De telles animations sont partiellement interactives au fil du temps. Les photos actuelles du paysage urbain sont enregistrées en même temps que les reconstructions virtuelles du même paysage au fil du temps. Cette technique permet de montrer l'évolution temporelle des édifices historiques géo référencés selon différents angles de vues. Toutefois, l'interaction est possible seulement avec les rendus et non à travers le modèle 3D, qui n'est pas structuré (Figure 9).

Le travail de (Schindler et al. 2007) part d'un principe opposé à celui que nous venons de décrire. L'auteur décrit une méthode pour ordonner chronologiquement une collection de photos historiques de la ville d'Atlanta éparpillées sur une centaine d'années. Cette méthode se base sur l'analyse des édifices visibles sur chaque photo. L'ordre d'apparition des photos est formulé comme un problème de satisfaction

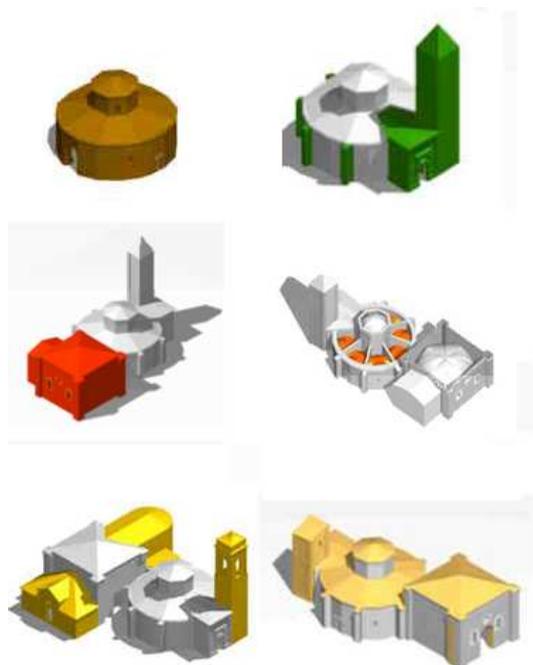


Figure 8. Etapes historiques de restitution de l'église de San Pietro, Asti, sur 800 ans : du XII^e siècle jusqu'au 1930, (Spallone 2005).



Figure 9. Images correspondantes à trois états historiques selon deux angles de vues différents

de contraintes (CSP³). Cette méthode permet de définir l'ordre chronologique des images malgré la présence d'occlusions sur certaines images. Le modèle 3D qui varie dans le temps à partir des images est créé automatiquement, en s'appuyant sur la technique de segmentation suivante. Les correspondances calibrées des photos sont insérées dans une matrice de visibilité : d'abord ses colonnes sont ordonnées pour déterminer l'ordre temporel, ensuite ses lignes sont réorganisées pour regrouper les points ayant les mêmes dates d'apparition et de disparition. Enfin, les enveloppes convexes de ces points sont calculées et la géométrie résultant est texturée automatiquement pour visualiser toute la scène. Les textures sont calculées en faisant premièrement la projection des triangles de la géométrie dans chaque image et deuxièmement la déformation de la région de l'image correspondante à la géométrie 3D.

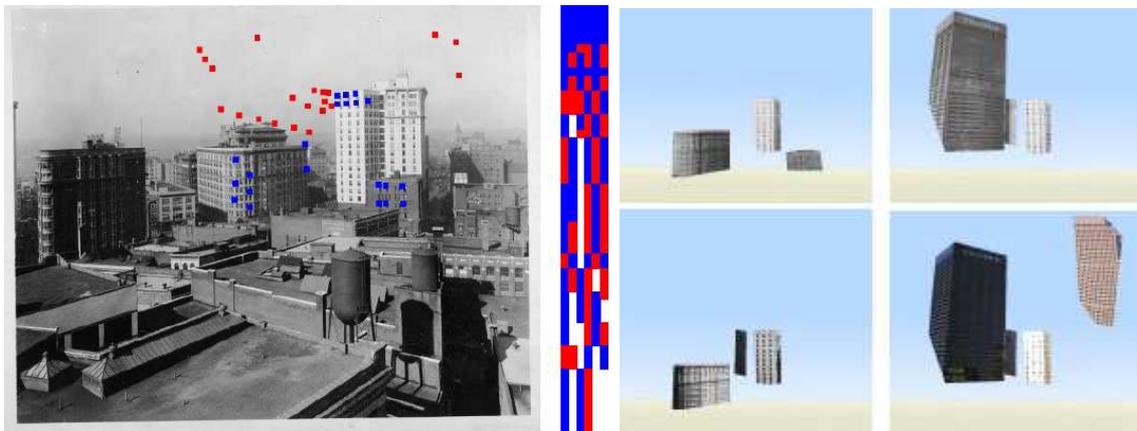


Figure 10. 4D cities : à gauche, classification des correspondances dans une matrice de visibilité ; à droite, structuration de la maquette spatio-temporelle en fonction du temps.

2.2.5. Approches qui visent à représenter les incertitudes

Peu d'applications visualisent les incertitudes en patrimoine historique : le volume substantiel des études se focalise plutôt sur des terrains d'expérimentation pertinents à la science des SIG (GIScience⁴). En effet ce domaine contient de nombreuses composantes incertaines : les coordonnées spatiales, le temps, la cohérence et l'exhaustivité. Le corpus théorique⁵ sur l'incertitude des données géographiques a été décrit largement par (MacEachren et al. 2005; Thomson et al. 2005; Johnson & Sanderson 2003; Dyreson & Snodgrass 1998; Pang et al. 1997). Face à des informations incertaines, la tendance générale est de chercher la meilleure réponse en terme de probabilité. Toutefois, la probabilité n'est pas le seul paramètre à prendre en compte : certaines recherches ont démontrées que l'estimation de l'incertitude est très utile aux experts dans la prise de décision. Sa représentation

³ Constraint Satisfaction Problem

⁴ GISsc. Théorie académique à la base du développement, de l'utilisation et de l'application des Systèmes d'Information Géographiques (GIS).

⁵ Une bibliographie très détaillée sur les implications cognitives de l'incertitude est fournie par (Zuk 2008; A. T. Pang et al. 1997; Evans 1997; Kardos et al. 2003; Leitner, Michael & Buttenfield, Barbara P. 2000; Slocum et al. 2003; Cedilnik & Rheingans 2000; Johnson & Sanderson 2003b; Love et al. 2005; Leitner & Curtis 2006; Lodha et al. 2008).

graphique permettrait donc d'améliorer le jugement (Evans 1997; Kirschenbaum & Arruda 1994; Leitner, Michael & Buttenfield, Barbara P. 2000). Pang catégorise les méthodes permettant de visualiser l'incertitude : les vues multiples, les vues en pseudo-couleurs, les lignes de contour, l'intermittence, le changement des propriétés du matériau, l'application de textures, l'oscillation, le déplacement et le brouillard, l'ajout de symboles/géométrie, la modification de géométrie ou des attributs, les animations, le traitement aux ultrasons et psycho visuel (Pang et al. 1997). D'autres études ont formalisé l'incertitude appliquée aux surfaces géographiques à travers des méthodes mathématiques (Anile et al. 2000; Gallo et al. 2000). En associant l'incertitude au modèle géométrique, cette approche fournit à l'utilisateur des outils pour estimer la fiabilité des résultats spatiaux.

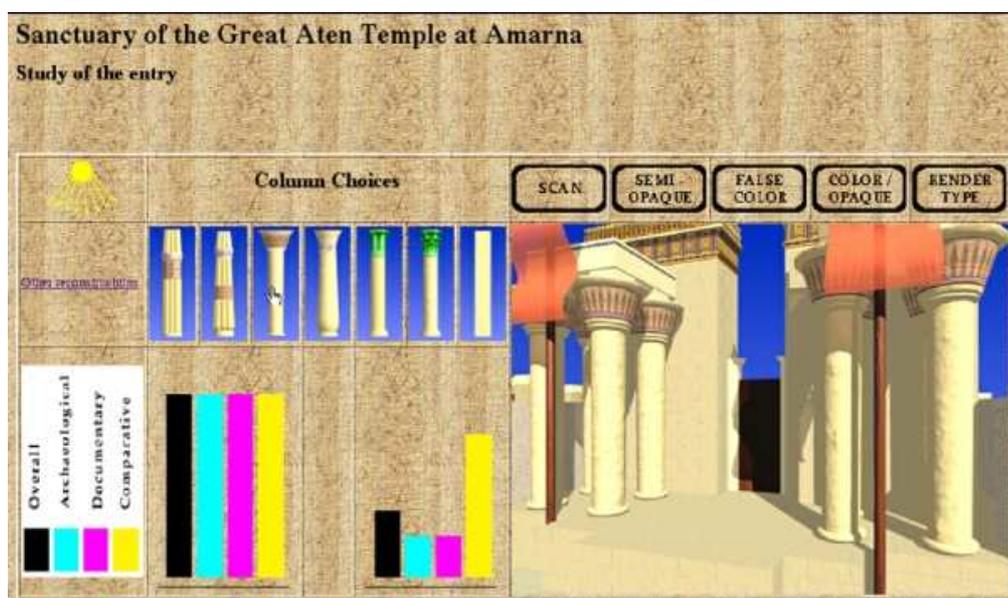


Figure 11. Restitution tridimensionnelle hybride d'opacité et de tonalité (Kensek et al. 2004).

Actuellement, l'infographie appliquée au patrimoine historique propose une vaste gamme de visualisations (en fil de fer, en transparence, ou avec différents types de rendu) qui nous amène à penser que l'objet architectural est décrit toujours de façon correcte, objective et complète (Strothotte et al. 1999). Peu de travaux font apparaître le niveau de certitude des restitutions tridimensionnelles (partielles ou complètes) abstraites en fonction des sources documentaires adoptées (Kensek et al. 2004; Strothotte et al. 1999; Zuk et al. 2005; Schlicht 2006; Schlicht 2008). Par exemple, (Strothotte et al. 1999) propose la visualisation de la maquette virtuelle en fil de fer ou en pointillé et accorde aux diverses épaisseurs des lignes un niveau de certitude qui se réduit au fur et à mesure que l'épaisseur s'allège. Le critère d'attribution de l'épaisseur est une valeur attribuée en fonction d'un coefficient de certitude. (Kensek et al. 2004) ont proposé une interface interactive basée sur le web pour l'interrogation de la restitution tridimensionnelle via sélection des éléments affichés dans la scène. Cette interface de contrôle permet de gérer un niveau de

confiance sur les éléments sélectionnés, et sur la nature des traces qui relient une construction virtuelle au monde réel passée ou présente. Les éléments sont donc affichés avec différentes techniques de rendu de façon abstraite (fil de fer, maquette neutre colorée) : les paramètres de saturation varient en fonction du niveau de confiance attribué à la restitution de l'élément par le dessinateur. Chaque élément sélectionné est classifié selon un niveau de fiabilité qui concerne les aspects archéologiques et documentaires. Enfin chaque artefact peut être visualisé grâce à un visualisateur QuickTime imbriqué dans l'interface.

2.2.6. Analyse critique des expériences présentées

Il semble qu'il n'y ait pas de raison logique qui conduirait à considérer que l'on ne peut pas représenter le passé. En réalité actuellement quatre facteurs nous empêchent de décrire correctement le passé en patrimoine historique :

- *La discrétisation du passé.* En infographie la description du passé manque de continuité : les évolutions historiques sont déléguées à de simples représentations d'états figés (si connus) ayant une durée limitée par rapport à la réelle évolution historique d'un site.
- *Indépendance des événements.* Les restitutions historiques ont tendance à montrer des édifices ayant un cycle de vie très élémentaire : par exemple un édifice est créé, ensuite une partie est rajoutée, et en l'occurrence il est détruit. La relation cause - effet entre divers événements et le cycle de vie du bâtiment ne sont pas pris en compte. A part la création et la démolition, les autres types de transformations que les édifices peuvent subir (union, division, variation, reconstruction, amplification, réaffectation, enterrement, déplacement), ni les causes conditionnant un changement du bâti ne sont considérées. Les restitutions se limitent à donner des informations brutes concernant l'époque de construction et les éléments techniques présents, sans pouvoir réellement expliquer les causes qui ont produit un changement, ni leur durée. De plus, les diverses étapes ne peuvent pas être comparées entre elles.
- *Incohérence des restitutions.* Certaines approches décrites auparavant mettent en évidence une faille fondamentale de l'infographie actuelle. Ces approches se basent sur une représentation de l'état passé conçu comme simple opportunité de visualiser et comprendre un espace autrement impossible à maîtriser et imaginer avec profusion de détails. Les restitutions sont donc rendues avec un niveau de détails élevé, même si on ne peut pas connaître avec certitude l'ancien aspect du site. Les rendus des sites anciens deviennent séducteurs (Kensek et al. 2004) et risquent de fausser la connaissance de l'objet car le public est amené à croire que le site avait vraiment cette apparence visuelle. Dans ce sens, la restitution est conçue comme « idée de rendu », selon la notion de (Golvin 2003). Au contraire, d'autres restitutions abstraites représentent les états historiques à l'aide de codes de couleurs qui mettent en évidence les parties rajoutées. Toutefois, la maquette 3D pourrait représenter bien plus que les édifices modifiés de chaque étape : elle pourrait être un outil pour décomposer, comprendre, structurer, analyser et comparer le processus de construction du bâti.

- *Structuration du modèle.* Toutes les approches illustrées décrivent les évolutions de la morphologie par des changements d'étape de la géométrie. Toutefois aucune structuration sémantique préalable de la morphologie de la maquette n'est effectuée afin de gérer l'affichage des évolutions. Surtout les approches de restitution à partir d'images (à partir d'une photo ou de dessins historiques) ne permettent aucune réflexion sur la structuration morphologique parce que chaque état restitué est considéré comme un modèle géométrique indépendant.

2.3. Conclusions

Ce chapitre a mis en évidence la multiplicité de paramètres nécessaires afin de restituer les états passés d'édifices. Premièrement, à partir d'une collecte de sources si variées, il est possible de produire des restitutions géométriques ayant des niveaux différentes de fiabilité; deuxièmement, la nature de sources peut être la cause de restitutions tridimensionnelles non structurées et désordonnées. Le panorama du domaine infographique ne fournit pas actuellement des méthodes de restitution géométrique uniformes et cohérentes avec les problématiques posées dans ce chapitre.

3. Représentation des transformations

Le territoire ne reste pas inchangé au fil du temps. Le patrimoine historique est dominé par des infinités de transformations. Les édifices ont des cycles de vie plus ou moins complexes et riches d'interdépendances : chaque édifice peut en effet s'amplifier, être démoli, reconstruit ou divisé et, plus rarement mais de même possible, sa position spatiale peut changer. Donc décrire le cycle de vie d'un bâtiment implique souvent la prise en compte des états et des transitions qui marquent les changements spatiaux le long d'un arc temporel. Si l'édifice est constitué d'éléments morphologiques qui peuvent varier, disparaître ou encore être modifiés, alors la maquette tridimensionnelle pourrait permettre d'afficher, décrire et sauvegarder les transformations. Toutefois, la maquette tridimensionnelle n'est pas actuellement adaptée à gérer les évolutions spatio-temporelles : en effet elle n'est pas encore considérée comme un outil de représentation dynamique. De ce fait, utiliser un modèle conceptuel qui décompose le système analysé en sous-systèmes selon les critères fonctionnels ou physiques (Ducounau et al. 1998), n'est pas suffisant. La complexité de l'édifice demande des systèmes de gestion des données plus judicieux, capables de gérer une description exhaustive du patrimoine architectural. Le modèle conceptuel devrait prendre en compte d'une part les transformations et les interdépendances complexes entre événements et phénomènes, d'autre part les divers niveaux de représentation. Par conséquent, une exigence de base est d'intégrer la modélisation temporelle et spatiale. Cette problématique est à la base d'un axe de recherche du réseau thématique pluridisciplinaire MoDys⁶ (GdR Modélisation des Dynamiques spatiales) dont la vocation est de favoriser la diffusion et le partage de concepts, des modèles et des outils de l'analyse spatiale.

⁶ MoDys <http://modys.univ.tours.fr>

Ce chapitre présente la thématique de la représentation des transformations de la façon suivante. D'abord, dans le paragraphe 3.1, nous expliquons la problématique de la représentation des informations historiques à la fois d'un point de vue technique et d'un point de vue cognitif. Ces aspects nous permettent de fixer la finalité d'une modélisation spatio-temporelle d'édifices patrimoniaux. Ensuite, dans le paragraphe 3.2, nous faisons un état de l'art de modèles de données spatio-temporelles. Les modèles de conception exposés seront discutés afin de comprendre lesquels sont les mieux adaptés à représenter les transformations du patrimoine historique.

3.1. Problématique

Aujourd'hui la représentation des états historiques en patrimoine architectural est une question encore ouverte. En effet deux aspects contribuent à rendre cette tâche compliquée : d'une part l'homme a tendance à percevoir un seul état à la fois, et il a donc des difficultés à se figurer les évolutions d'un lieu, d'autre part les transformations du patrimoine bâti sont très variées. Ces aspects sont détaillés dans les paragraphes suivants.

3.1.1. La perception d'un seul état

L'homme est immergé dans un environnement changeant en permanence. Malgré qu'il soit capable de s'adapter à la dynamique de l'environnement et de construire des structures temporelles (Michon 1993), il a besoin de fixer des repères dans l'environnement. Il a donc des difficultés à figurer les évolutions d'un lieu. Dans les années 60, l'urbaniste Kevin Lynch mène une étude durant cinq ans sur la perception et l'organisation de l'information spatiale des citoyens lorsqu'ils se déplacent dans la ville (Lynch 1960). Le résultat a indiqué que les citoyens connaissaient leur environnement de manière cohérente et prévisible, formant des cartes mentales avec cinq éléments: les parcours, les limites physiques, les quartiers, les nœuds et les repères. L'homme a donc tendance à créer des modèles mentaux basés sur des repères statiques. Quand une évolution dénature un lieu, le modèle mental est modifié selon les nouveaux repères. Si les évolutions d'un lieu se succèdent dans un arc temporel ni trop court, ni trop long, l'homme peut distinguer les événements comme présent et passé, et peut s'apercevoir de leur durée.

Cette première réflexion est complétée par une deuxième. L'homme est prédisposé à simplifier les formes complexes en formes plus simples et préférablement symétriques. La symétrie joue un rôle essentiel dans la phase de mémorisation des formes spatiales (Boden 2006; I. Hargittai & M. Hargittai 1994). En effet, d'une part les animaux tendent à être symétriques (Figure 12a), d'autre part les patterns symétriques sont plus facilement détectables (Figure 12b). De l'antiquité grecque jusqu'à la Renaissance, la symétrie a donc été identifiée avec la notion d'harmonie et de juste proportion entre les diverses parties d'un objet et elle a été utilisée comme critère pour la conception des édifices (Figure 12c). Certaines recherches (Leyton 1986a; Leyton 1986b; Leyton 1987) ont montré que les sujets humains créent des modèles mentaux d'objets par l'introduction successive des symétries globales. Une séquence d'expériences psychologiques menée dans les années 80 (Leyton 1987) a démontré que même les architectures émergentes basées sur des formes libres sont simplifiées

dans des modèles mentales : les architectures telles que celles de Peter Eisenman, Zaha Hadid, Frank Gehry, Coop Himmelblau, Rem Koolhaas, Daniel Libeskind, Greg Lynn ou encore Bernard Tschumi sont organisées par le système perceptif humain selon une hiérarchie de symétries (Figure 12d). Tout particulièrement dans le cas d'un dessin asymétrique, le système humain a tendance à décomposer la forme complexe dans une hiérarchie de symétries imbriquées, où la forme, à chaque niveau de transformation, fait référence à des éléments de plus en plus simplifiés.

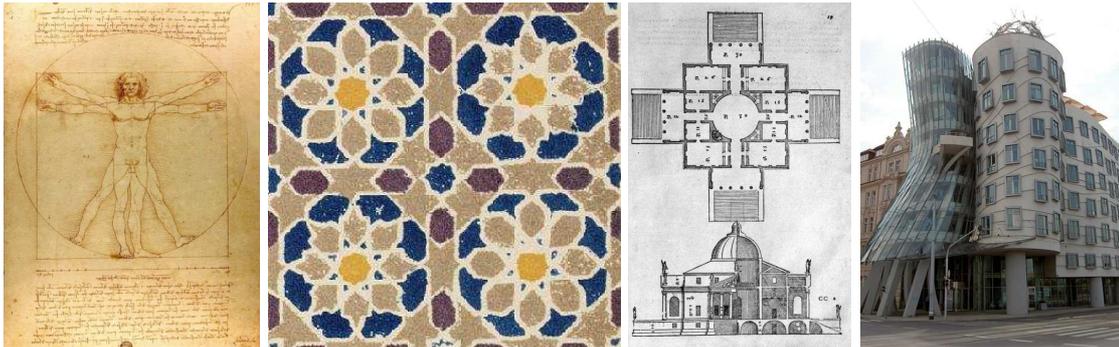


Figure 12. a) L. Da Vinci. Etude de proportions sur le corps humain ; b) Symétrie dans la géométrie des mosaïques murales de l'Alhambra, Grenade, Espagne ; c) Villa Capra dite *la Rotonda*, Vicenza, Italie. A. Palladio, 1566 – 1571, I Quattro libri dell'architettura (Venise, 1601) Collection RIBA, Londres; d) Maison dansante à Prague, Frank Gehry.

3.1.2. Les transformations du patrimoine historique

Le patrimoine historique, par sa nature, est composé d'édifices, monuments, statues et décors (plus génériquement appelés *artefacts*) qui n'ont en général pas une forme constante dans le temps. Dans la plupart des cas ils subissent des nombreuses transformations, d'une de leurs parties ou de l'ensemble. Si on assume que le patrimoine historique par sa nature n'est pas uniforme dans le temps, il faut donc différencier les deux phases qui décrivent la vie d'un artefact : la phase de transition (changement) et celle de persistance (invariabilité).

- La phase de *transition* d'un artefact désigne une succession de modifications physiques de l'objet historique. Le processus de variation peut avoir diverses causes (d'origine naturelle ou humaine). Par exemple, une guerre ou un tremblement de terre peuvent être à l'origine d'une destruction d'un complexe d'édifices.
- La phase de *persistance* d'un artefact est un arc temporel pendant lequel l'artefact ne subit pas de transformation, et il reste donc invariable.

De toute évidence, ces deux notions sont strictement liées à celle de *durée de vie* des artefacts. En effet le cycle de vie d'un artefact est composé d'une succession d'états de transition et de persistance. Un cycle de vie démarre toujours avec un état de transition (qui désigne la création de l'artefact), ensuite il peut être constitué de l'alternance de plusieurs phases de transition et de persistance, et enfin, s'il n'est pas

terminé, il peut représenter l'état courant par une transformation en cours ainsi que par un état d'invariabilité.

De façon générale, la *relation cause-effet* domine le processus de transformation des bâtiments (Leyton 1992). Premièrement, les transformations des édifices sont dominées par des causes variées, qui peuvent avoir une origine naturelle (cataclysmes naturels tels qu'un incendie, des vents forts ou un tremblement de terre) ou qui peuvent dériver des actions humaines (une modification apportée sur l'artefact par volonté du propriétaire, un changement de propriété, une guerre, l'abandon d'un édifice). Deuxièmement, les causes ne sont pas toujours connues. Parfois l'action qui a déterminé un changement n'est plus observable, et on connaît seulement ses effets ; d'autres fois les actions qui ont causé une transformation sont connues et quelque fois leurs traces sont lisibles sur les bâtiments. En tout cas, alors qu'un événement est toujours en cours, sa durée ne peut être évaluée. Troisièmement, l'effet (l'état de persistance d'un artefact) est la *trace* d'un processus de transformation (Dudek & J.-Y. Blaise 2008). A titre d'exemple, suite à un tremblement de terre, l'action n'est plus observable, mais sa trace, la démolition partielle ou entière des édifices ou leur dégradation, est observable. Le cycle de vie d'un édifice peut donc être affecté par différents types de transformations qui seront définis ci-après.

3.1.2.1. Les types de transformations

Les transformations potentielles tout au long de la vie d'un bâtiment sont nombreuses et de nature différente (Stefani et al. 2008). Certaines parmi ces transformations concernent la totalité du cycle de vie de l'édifice (construction, démolition, reconstruction, union, division, réaffectation), d'autres concernent seulement certaines parties de sa morphologie (variation, déplacement, dégradation, dissimulation). On présente ci-après les types de transformations qui peuvent concerner les édifices. Pour un panorama étendu de transformations concernant d'autres échelles du patrimoine historique (telle que l'échelle urbaine, ou celle de l'objet), consulter l'Annexe A.

- *création* : conception d'un artefact à un certain moment (date ou période) ;
- *démolition* : action de destruction complète d'un artefact au sens large (édifice, objet archéologique, etc.) ;
- *reconstruction* : action de réédification d'un artefact (un édifice, une partie fonctionnelle, ou un objet archéologique) tout en gardant *le même rôle* dans son contexte (urbain, architecturale ou décoratif) ;
- *division* : action de séparation d'un artefact en plusieurs parties ayant des rôles ou des fonctions différents.
- *union* : action d'association de différents artefacts morphologiques afin de créer un unique artefact.
- *réaffectation* : modification et redistribution d'un groupe d'édifices dans une configuration différente. Deux ou plusieurs artefacts sont fusionnés et deux ou plusieurs artefacts différents résultent de la modification. Cette transformation est la combinaison d'une union et d'une division.

- *variation* : modification quelconque de la morphologie de l'artefact qui ne modifie pas le rôle ni la fonction de l'artefact. L'amplification et la démolition partielle d'un artefact appartiennent à cette catégorie.
- *déplacement* : délocalisation d'un édifice ou d'une de ses parties dans un autre lieu.
- *décadence/dégradation* : détérioration lente de certaines parties (structurelles ou décoratives) d'un artefact qui amène à l'état d'abandon.
- *revêtement/enterrement* : couverture d'un artefact qui est amené d'un état de visibilité à un état d'invisibilité.

De plus, d'autres transformations qui ne comportent pas nécessairement des changements morphologiques peuvent caractériser les artefacts:

- *changement de fonction* : un édifice subi une transformation fonctionnelle (par exemple une église est affectée à une fonction muséale). Dans certains cas, ce type de changement peut impliquer des variations morphologiques.
- *changement d'identité* : un édifice change de nom. Le changement de nom dépend des évolutions de la société, de la langue ou des traditions populaires.
- *changement de propriétaire* : à travers un contrat privé ou public un artefact est vendu à un nouveau propriétaire.

3.1.2.2. La durée des transformations

Les facteurs qui contribuent à une transformation peuvent causer des variations graduelles et lentes, ou encore des modifications soudaines. Les changements concernant un édifice peuvent avoir différentes *granularités*⁷ temporelles : ses transformations peuvent donc être *soudaines* ou *graduelles*. Le changement de propriété est un événement soudain, matérialisé par un acte de vente ; en revanche d'autres changements progressifs existent : à titre d'exemple la démolition d'un bâtiment est un événement presque instantané (normalement elle occupe quelques journées) ; en revanche, la construction d'une cathédrale gothique est un événement plutôt long (si on imagine que le chantier de construction durait quelque siècle). Encore, la dégradation d'un bâtiment peut prendre des siècles ou des milliers d'années. On s'aperçoit que la modélisation spatio-temporelle doit représenter des transitions à la fois graduelles et aussi instantanées.

3.1.3. Modélisation spatio-temporelle d'édifices patrimoniaux

Indépendamment du domaine d'application, l'objectif principal d'un Système d'Informations spatio-temporel est celui de représenter diverses connaissances et raisonnements. Une modélisation pertinente doit permettre de représenter des

⁷ Granularité : taille minimale d'un élément pouvant être manipulé par un système. Pour plus de détails voir l'Annexe B.

informations à la fois spatiales et temporelles, de mettre en évidence leurs relations afin de permettre une prise de décision ou un raisonnement ultérieur. Les informations peuvent être triées grâce à des requêtes variées effectuées à partir d'une base de données :

requêtes sur la position, les propriétés et les relations spatiales. Ce genre de requêtes inclut des questionnements sur :

- les attributs simples des objets (par exemple, qui est le propriétaire de tel édifice ?),
- leurs positions (par exemple, où est situé l'édifice ?),
- les relations topologiques (quels sont les édifices construits sur tel complexe de fouilles ?),
- les relations de proximités (quel est l'édifice plus près ?).

requêtes sur le temps, les propriétés et les relations temporelles. Ce genre de requêtes comprend :

- les requêtes temporelles simples (par exemple, quelle est la date de construction d'un édifice ?),
- les requêtes sur un arc de temps (quelle est l'évolution d'un édifice sur la période t ?),
- des requêtes plus complexes concernant les relations topologiques temporelles (par exemple, identifier les édifices construits sur un site en même temps et dont la construction a une durée inférieure à six mois).

requêtes sur le comportement et les relations spatio-temporelles. De telles requêtes sont classifiées en trois sous-catégories :

- les requêtes spatio-temporelles simples et basées sur des changements discrets (par exemple, vérifier quel est l'état d'un édifice au moment t),
- les requêtes sur des intervalles spatio-temporelles (par exemple pour connaître les changements concernant un site historique le long d'une période précise) ,
- les requêtes spatio-temporelles sur le comportement, basées sur les opérateurs unaires comme la vitesse ou le déplacement (par exemple, quelle est la vitesse du processus de dégradation d'un artefact).

3.2. Etat de l'art des modèles existants pour la représentation des transformations

La notion temporelle était toujours considérée comme imprécise et presque inutile. Les premières approches utilisaient le temps seulement comme attribut pour indexer des faits précis. Ce n'est que depuis 15 ans que la formalisation des changements (de faits et situations) entre deux états temporels successifs a commencé à être développée. Les premières réponses à la problématique du changement spatio-temporel proviennent du domaine du SIG (Système d'Information Géographique). La recherche dans ce domaine a commencé depuis environ 30 ans quand s'est manifestée la nécessité de structurer des relations entre les notions d'espace et de temps. Le traitement des données géographiques a fourni les premières occasions pour gérer des données spatiales. Les SIG sont devenus des outils de gestion, de diagnostic, de négociation et d'aide à la décision concernant le développement du territoire. Actuellement, les approches de modélisation visent à résoudre les problématiques liées aux changements dans le monde réel au travers des développements informatiques incluant des bases de données dynamiques. Par conséquent, les concepts autour desquels le processus de modélisation doit être décrit sont la notion d'espace, de temps, d'évolution, de continuité, de discrétisation du changement, et enfin de dynamique du changement (pour des notions plus détaillées, consulter l'Annexe B). Tout au long de l'histoire des ordinateurs et du développement des systèmes informatiques, une abondance de langages de modélisation conceptuelle sont apparus, comme par exemple les diagrammes entités-relations et diagrammes de flux des données. Chaque modèle est plus ou moins adapté à certaines utilisations et il peut révéler des qualités et des défauts par rapport à l'optimisation de la requête et aux résultats obtenus. (Krogstie & Sølberg 1996) divisent les langages de modélisation différents points de vue :

Le point de vue structural. Cette perspective se base sur la notion de données et de modèle. Ses principales composantes sont les entités, les relations, les attributs et les contraintes sur les relations.

Le point de vue fonctionnel. Cette perspective se concentre sur les processus plutôt que sur les données. Les diagrammes de flux de données sont le langage conceptuel le plus connu.

Le point de vue du comportement. Ces modèles décrivent comment les objets changent au fil du temps à travers la notion d'états et transitions. Leur désavantage est que les systèmes trop grands et complexes deviennent rapidement ingérables.

Le point de vue basée sur les contraintes. Leur principale application sont les systèmes de connaissance et intelligence artificielle. Ces systèmes expriment des contraintes sur les autres modèles (tel que celui structurel ou fonctionnel).

Le point de vue orienté objet. Cette perspective s'est développée pour soutenir les langages de programmation orientés objet comme Smalltalk, C++ et Eiffel.

Le point de vue de la communication. Ce point de vue est basé sur l'hypothèse du langage et sur la théorie de l'action développées par Austin et Searle (Austin 1962).

Le point de vue agent. Il est fondé sur les idées d'acteurs, rôles et agents, développées lors de travaux sur la programmation orientée objet et des agents.

Dans ce paragraphe, notre propos est de tenter une classification d'approches conceptuelles pertinentes aux problématiques du domaine patrimonial. De ce fait, les approches de modélisation spatio-temporelle sont organisées en fonction de *l'objet* de la représentation. Pour chaque classe, seulement quelques modèles sont décrits afin d'en définir les objets, les relations, les règles et les faiblesses, et pour comprendre quels sont les choix pour développer une base de données solide. Une revue très détaillée des modèles de base de données spatio-temporelle de ces vingt dernières années est fournie dans (Pelekis et al. 2004).

3.2.1. Modèles visant à représenter les objets

Les modèles qui visent à représenter les objets sont très variés. Certains ont des capacités très limitées comme ceux qui proviennent du domaine du SIG (Snapshot Model, Space Time Composite Model et Time-Stamping Model) et d'autres utilisent des objets plus complexes (modèles orientés objets). Les modèles de données **par Snapshots** (Langran 1992) et basé sur **Time-Stamping** n'explicitent pas les changements car le premier combine les attributs temporels dans un modèle de données spatiales à travers l'enregistrement du temps par calques, et le deuxième associe aux objets deux enregistrements de temps (*timestamps*), un pour la *création* et un pour la *cessation* de l'objet. Les relations temporelles n'étant pas explicites, ces modèles s'avèrent très inadéquats. Dans le modèle **Space Time Composite** (Langran & Chrisman 1988), les lignes dans l'espace et dans le temps sont projetées sur le plan spatial et sont croisées les unes avec les autres pour créer un maillage de polygones (*mesh*). Dans ce maillage, à chaque polygone est associé l'historique de ses attributs. Chaque changement entraîne une rupture de la portion territoriale, la coupure avec l'objet parent et la création d'un historique distinct. (Pelekis et al. 2004) fournit un état de l'art très approfondi d'un nombre important de **modèles orientés objet**. Pour en citer les plus importants, Worboys (Worboys et al. 1990) est le premier à mettre en évidence l'orientation objet dans le panorama de modélisation et à définir la notion d'objet spatio-temporel. (Wachowicz & Healey 1994) a introduit un modèle orienté objet, qui gère pour la première fois la notion de versions (version d'objet et configuration d'objet). (Bonfatti & Monari 1994) proposent l'utilisation à la fois d'objets complexes pour exprimer la structure et les relations, et des lois de description du comportement de leurs composantes. (Rojas-Vega & Kemp 1995) décrivent une structure pour les applications spatiales distribuées multimédias et développent le langage SIDL (*Structure and Interface Definition Language*).

Renolen (Renolen 1997b) utilise le langage OMT (*Object Modeling Technique*) de modélisation de l'objet pour représenter les phénomènes naturels. Là les états statiques sont représentés par des versions et les états dynamiques sont représentés par des transitions. Des graphes historiques (voir paragraphe 3.2.2) représentent les descripteurs de ces étapes. Cette base a été agrandie à la base spatio-temporelle STOM (*Spatio-Temporal Object Model*) (Figure 13). Ce modèle est très adéquat à connecter des objets indépendants. Par rapport aux autres modèles, le modèle orienté objet incorpore les caractéristiques comme les classes, les instances, les attributs, les

données abstraites, opérations, méthodes, classification, agrégation, héritage, polymorphisme et liens dynamiques. On compte quatre avantages à son utilisation : premièrement, un seul objet peut représenter l'historique entier de l'entité ; deuxièmement, les requêtes sont simples ; troisièmement, le traitement des données temporelles est efficace ; enfin la manipulation des données spatiales et temporelles est uniforme.

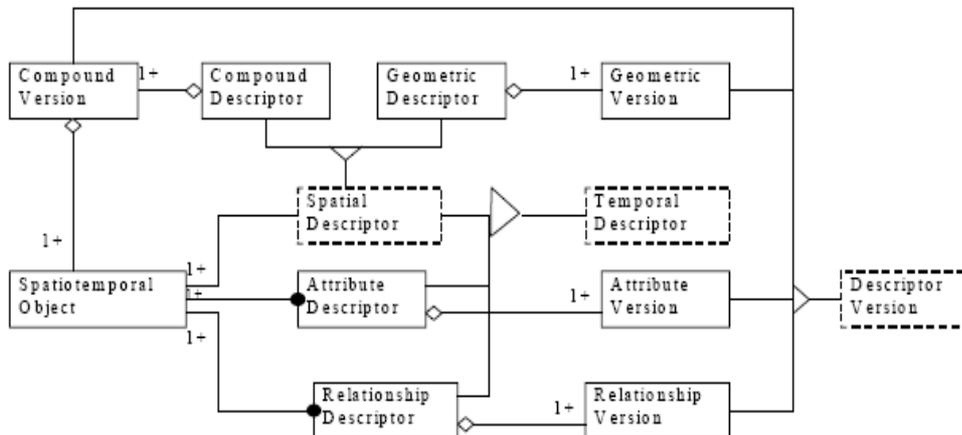


Figure 13. STOM (Spatio-Temporal Object Model). Dans (Renolen 1997b).

3.2.2. Modèles visant à représenter les changements

Des nombreuses typologies de modèles visent actuellement à représenter les évolutions : les modèles orientés événements, objet-relation, les extensions du modèle entité-relation, le modèle des 3 domaines ou encore celui des graphes historiques. Le **modèle orienté événements** identifie des changements individuels car il représente les événements explicitement, dans un *journal des transactions*. Le modèle TEMPEST (D. Peuquet & Wentz 1994), une adaptation du modèle raster ESTDM (D. Peuquet & Duan 1995) et l'approche vectorielle par modification (Langran 1992) suivent cette orientation. Le **modèle objet-relation** décrit les processus des changements qui agissent sur les attributs géométriques de l'entité en connexion avec l'espace et le temps. Des quatre méthodologies développés (Modul-R, Mecosig, Pollen, MADS), MADS (*Modeling Application Data with Spatio-temporal features*) (Parent et al. 1999) est la dernière. Le **modèle de 3 domaines** (Yuan 1996) traite la sémantique, l'espace et le temps comme des éléments séparés et fournit des liens entre eux pour décrire les processus et les phénomènes géographiques. Le domaine sémantique contient seulement des concepts indépendants de leur position spatiale et temporelle. Ce modèle vectoriel a l'avantage de gérer les mouvements aussi bien que les changements. Là aussi les modèles structurels **entité-relation**, qui sont à l'origine des modèles statiques, ont été étendus pour supporter les changements au fil du temps. Modèles comme le modèle ERT (Entity-Relationship-Time) (McBrien et al. 1992) et le modèle STER (Spatio-Temporal Entity-Relationship) (Tryfona & Jensen 1999; Tryfona 1998) supportent le temps grâce à l'utilisation de sauvegardes temporelles (time-stamping) d'entités, d'attributs et des relations (entre entités et attributs). Le modèle

STER est bien adapté pour les objets en mouvement, à la fois ceux ayant des changements discrets, et ceux qui intègrent le mouvement au changement de forme.

Par rapport aux modèles précédents, le **modèle de graphes historiques** permet de gérer de façon explicite les changements et leur durée. En effet, souvent les objets sont représentés statiquement mais beaucoup de changements ont une durée. La réalité montre un éventail de comportements temporels, qui peuvent être classifiés en trois catégories d'objets : les objets en changement continu, les objets statiques qui ont été changés par des événements avec une durée, les objets statiques qui ont été changés par des événements brusques. L'auteur a traité ce modèle pour identifier les types de comportement temporel et pour contrôler les événements (Renolen 1997a; Renolen 1997b; Renolen 1997c). Dans sa notation (Figure 14a), l'objet peut être visualisé par des rectangles (si les états de l'objet sont statiques), des ellipses (s'il est en état de changement) ou des cercles (si le changement est brusque). Chaque objet est identifié par deux enregistrements temporels en décrivant l'intervalle du temps de validité de l'objet. Chaque transition est une entité qui met en relation une version d'objet avec la version suivante ou précédente. Des liens ou des flèches entre les états décrivent la relation existante avec les états précurseurs et successeurs. De cette façon, l'historique d'un objet peut être décrit à travers la succession consécutive de versions et transitions : si les objets subissent un changement soudain, ils sont décrits par des transitions de durée nulle (il s'agit des événements), tandis que si les objets subissent un changement continu, alors ils sont décrits par des versions (d'objets) de durée nulle.

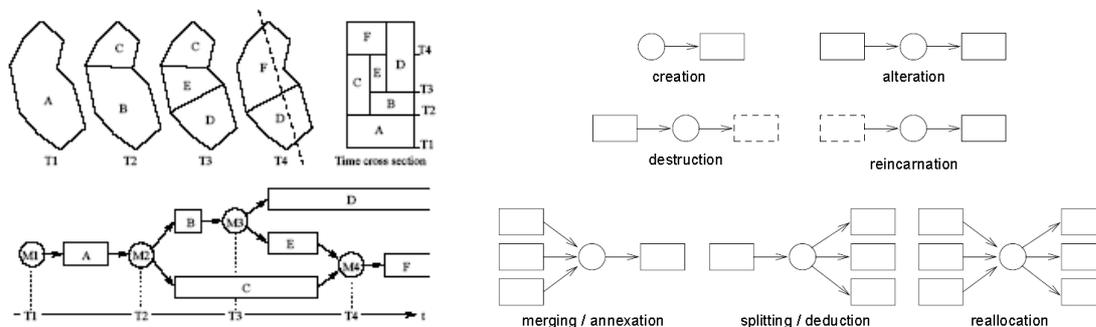


Figure 14 a) Les types de comportements des Objets Temporels. Dans (Renolen 1997a) ; b) Les sept types basiques de changements.

D'une manière générale, il est possible d'identifier au moins six types de transitions des objets (Figure 14b) : la *création* (un objet est créée), l'*altération* (un objet est changé ou modifié par rapport à un attribut ou à la géométrie), la *cessation* (un objet est détruit dans le monde réel), la *réincarnation* (un objet précédemment détruit est réintroduit avec un nouvel état et positionnement), la *division / déduction* (un objet est coupé en deux ou plusieurs objets, ou un ou plusieurs objets sont déduits d'un objet existant) l'*union / annexion* (deux ou plusieurs objets sont unis ensemble ou ajoutés à un autre objet). Un septième changement est décrit par la *réallocation* (plusieurs objets sont unis et divisés selon de nouvelles logiques). Ce changement

correspond à la combinaison d'une union et d'une division. A la différence des modèles orientés événements et orientés objets, ce système de graphes gère à la fois les événements et les objets, en permettant une exploitation complète des procédures. Les graphes historiques permettent de décrire une extension limitée de temps et d'espace, donc une *histoire*. L'avantage de ce modèle vectoriel est que l'analyse des relations temporelles est immédiate, et le temps peut être considéré comme discret ou continu, absolu ou relatif. L'axe du temps est linéaire, et les temps de validation et de transaction sont supportés.

3.2.3. Modèles visant à représenter le mouvement

Les **réseaux de Pétri** ont été proposés en 1962 par C.A. Pétri comme outil mathématique pour la modélisation du comportement d'un système d'information dynamique aux événements discrets. Ce modèle est caractérisé par les places, la transition, l'arc orienté et le jeton. Leur structure statique correspond à une triple $N(P, T, F)$ qui peut également être représentée par un graphe. Dans ce graphe, des arcs (F) lient des conditions (P) à des transitions (T) dans les deux directions. La condition (représentée par un cercle "O") se réfère habituellement à l'état de ce système ; la transition (représentée par une ligne verticale courte "|") correspond à l'événement en changeant l'état ; l'arc lie l'état et l'événement. La structure des Réseaux de Pétri (P, T, F) décrit des relations entre l'état et les règles d'événement ou de système. Le jeton (l'état du système à un certain moment) est ajouté au graphe pour augmenter les fonctionnalités de simulation de phénomènes statiques et dynamiques.

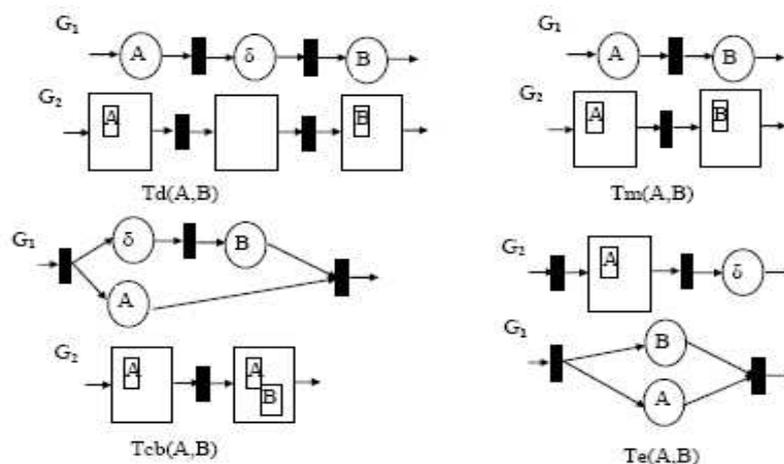


Figure 15. Relation entre les éléments. (Y. Liu & Zhong-xiao Hao 2005).

Généralement les géométries peuvent changer de façon discrète mais également continue, quand l'objet est en mouvement. Dans cette approche le temps est modélisé comme une part intégrale des entités spatiales ; le modèle de temps est linéaire, discret/continu, absolu, et le temps de validation est considéré uniquement au début. Un travail représentatif a été effectué par Erwig (Erwig et al. 1999). Dans cette étude l'auteur a proposé principalement le concept d'*attribut dynamique*, qui définit l'attribut comme un continu temporel. Deuxièmement, un *vecteur de mouvement* (constitué de son positionnement, vitesse et direction) permet de prédire le futur. Par ailleurs, les réponses aux requêtes dépendent non seulement des contenus de la base

de données mais aussi du temps auquel la requête a été faite. L'auteur a proposé le langage FTL (*Future Temporal Logic Language*) et le modèle MOST (*Moving Object Spatio-Temporal*). Ces recherches sont toutes élaborées pour exprimer les objets et les manques d'intégrité dans les expressions sémantiques des objets en mouvement. Dans l'étude de (Y. Liu & Zhong-xiao Hao 2005) par exemple, les contraintes spatio-temporelles des objets en mouvement sont présentées à travers les réseaux de Pétri (Figure 15).

3.2.4. Modèles visant à décrire des échelles multiples de représentation

Dans cette approche (Yin 2005), les **Réseaux de Pétri** sont utilisés pour décrire des états d'une instance de représentation, les événements à diverses échelles et les relations entre ces états et les événements (Figure 16). Contrairement aux autres modèles hiérarchiques multi-mesures (où la variable d'échelle peut seulement choisir des échelles finies), dans le modèle de Pétri, la variable d'échelle peut gérer les changements continus, en fournissant les bases théoriques pour l'interaction dans une carte à l'échelle variable. Sa structure hiérarchique d'arbre / graphe permet de réaliser des cartes avec plusieurs échelles spécifiques (Figure 17). De plus, en ce qui concerne les relations, les réseaux de Petri enregistrent les relations entre les événements à une échelle initiale et les instants représentés avec une haute résolution : ces événements sont définis soit à travers la valeur d'échelle au départ, soit par la valeur d'échelle à la fin d'un état. Les entités peuvent être des points, des lignes, des aires, mais aussi des éléments plus complexes (villes, routes, etc.) ; les attributs peuvent être spatiaux ou non ; les relations sémantiques de base peuvent concerner l'agrégation, la généralisation, la classification et enfin l'association. De même, la structure du modèle est basée sur six dimensions des objets: *x*, *y*, *z* (dans l'espace géométrique), *attribut*, *temps*, et *échelle*. Le temps et l'échelle peuvent changer les objets géographiques respectivement pour leur quantité ou qualité, en produisant différentes versions d'objets au niveau temporel et d'échelle. L'avantage de ce modèle est qu'il associe organiquement les états, les événements et les relations qui les relient. Premièrement, il peut simuler la visualisation des changements d'une même entité cartographique à différentes échelles (analyse multi-mesure). Deuxièmement, il permet de formuler des requêtes concernant des instants tout le long de l'évolution. De ce fait, les cartes géographiques à échelles multiples peuvent être actualisées rapidement.

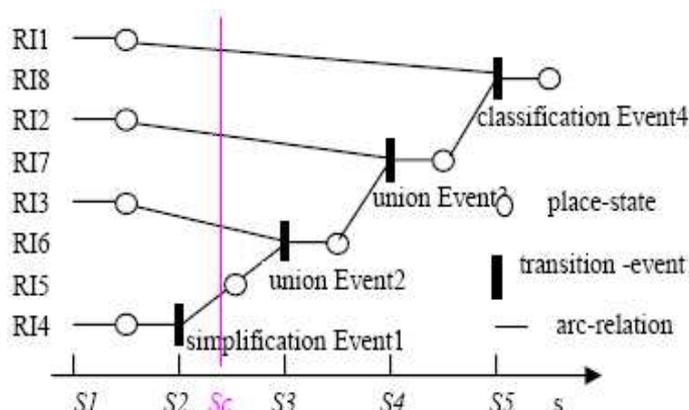


Figure 16. Représentation des états, des événements à échelles multiples et de leurs relations au travers des Réseaux de Pétri. Dans (Yin 2005).

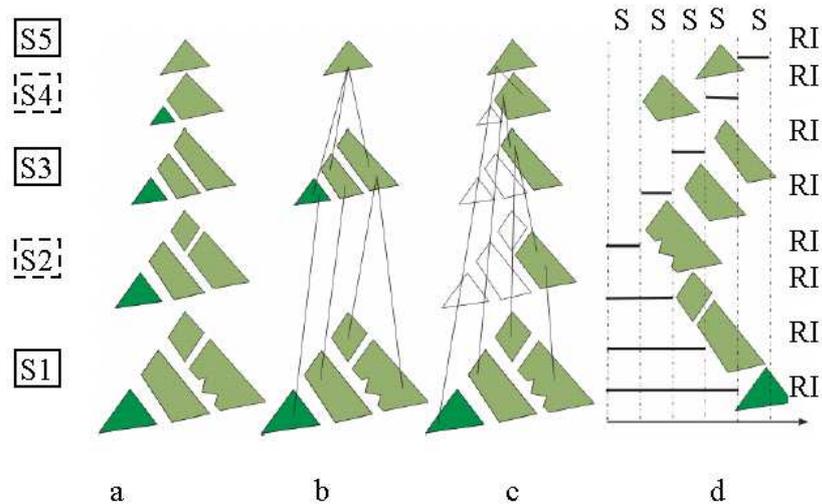


Figure 17. Modèles de représentation à échelles multiples. Représentation d'une carte géographique selon : des instances (a), des hiérarchies (b), les structures de Petri (c), et du cycle de vie (d). Dans (Yin 2005).

3.2.5. Modèles visant à représenter le processus

Dans le domaine de l'Ingénierie des Systèmes la notion de temps joue un rôle fondamental. En effet le SGDT (Système de Gestion des Données Techniques) gère le processus et les informations dans le temps à travers ses services et ses tâches. A titre d'exemple, on analyse la coordination de l'ingénierie des produits et des systèmes de production au sein de PSA-Peugeot-Citroën (Lardeur et al. 2003). Dans ce cas, une des étapes de la gestion de processus est la gestion de la structure « produit », qui traite la décomposition du produit en ensembles et sous-ensembles. Cette décomposition est décrite par une arborescence de développement (Figure 18a), où chaque élément de l'arbre coïncide soit avec un nouveau système soit avec un élément réutilisé (totalement ou partiellement). L'architecture de construction gère l'ensemble de ces systèmes et sous-systèmes du produit final (par exemple une famille de véhicules, un nouveau moteur, une base véhicule, etc.). De plus, chaque projet suit la décomposition successive du système (la hiérarchie) (Figure 18b).

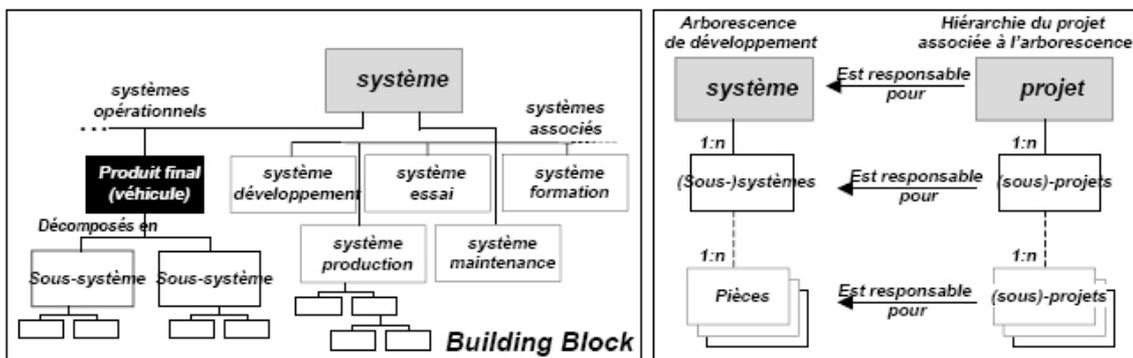


Figure 18. a) Les blocs de construction dans l'EIA 632. b) La correspondance système / projet dans l'ISO 15 288. Dans (Lardeur et al. 2003).

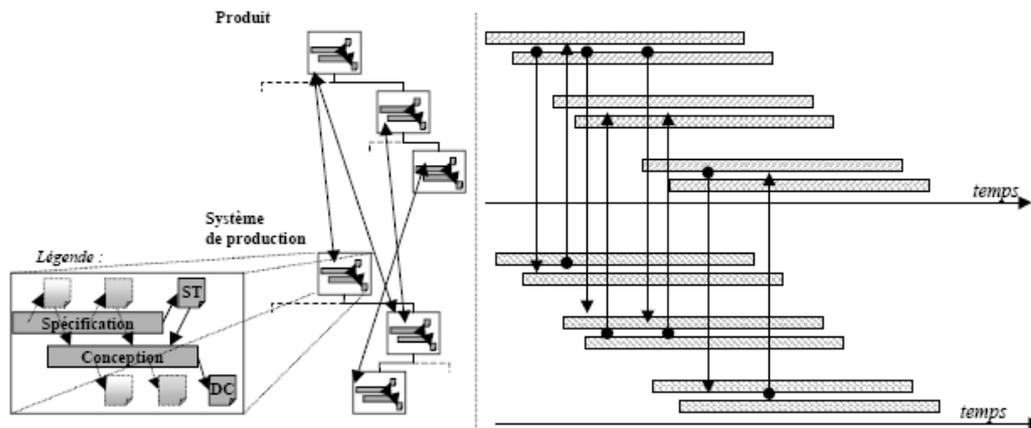


Figure 19. A gauche, représentation des liens entre les systèmes des arborescences de développement sans notion temporelle. A droite, représentation des contraintes de planification avec notion temporelle chez Ford. Dans (Lardeur et al. 2003).

Comme résultat, pour chaque arborescence de chaque système les deux activités principales d'ingénierie (la spécification et la conception) sont réalisées en parallèle. Selon l'objectif de représentation du système, la notion de temps peut donc être utilisée. Par exemple, dans la Figure 19 (à droite), les liens temporels sont représentés par des points de rencontre entre les plannings de ces systèmes, car l'objectif est de représenter les contraintes de planification tout au long du processus. Ces liens permettent la planification et la maîtrise de l'ingénierie, en traduisant les associations entre les systèmes de chaque arborescence de développement. Chaque lien peut être caractérisé par la date et la nature d'un produit, et il est matérialisé par des flèches.

3.2.6. Analyse critique des modèles de conception

Les modèles présentés ont des caractéristiques différentes qui les rendent plus ou moins adaptés aux exigences de description du patrimoine architectural. Dans cette section, on se propose d'analyser les caractéristiques de chaque famille de modèles en fonction des exigences de notre cadre d'application. Les tableaux en Annexe C résument les résultats de cette comparaison. Les modèles méritent d'être analysés en fonction des paramètres suivants :

- *La notion de temps.* A l'exception des modèles conçus pour décrire les objets (où les attributs temporels ne sont pas forcément explicités), dans les autres approches le temps est incorporé par des enregistrements d'états qui prévoient des relations temporelles explicites.
- *La modélisation discrète/continue.* Dans la plupart des approches les changements sont ponctuelles : elles ne permettent pas de décrire comment un objet s'est transformé d'un état à l'autre. Seulement les modèles visant à décrire le mouvement et les échelles multiples (Réseaux de Pétri), utilisent une approche continue. En effet ces modèles expriment les transitions d'un objet

d'un état à l'autre de façon sémantique. Donc à chaque transition, des informations sont ajoutées dynamiquement au niveau *temporel* et les discontinuités sont visualisées là où elles sont présentes.

- *La topologie.* La topologie et la mesure de son évolution sont très importantes parce que directement liées aux types des changements spatiaux des objets. Toutefois, ce concept est traité seulement dans les approches *orientées objet* et décrivant *les objets en mouvement*. Dans ce cas, un seul objet peut représenter l'histoire entière de l'entité et les états dynamiques sont représentés par des transitions.
- *La durée.* Malgré le fait que la majorité des changements aient une durée, ce concept n'a pas été traité par les modèles qui décrivent les objets. Seulement le modèle des *Graphes Historiques* gère cette notion : les graphes historiques identifient les transformations de l'objet en gardant son histoire.
- *Ordre du temps.* Dans la plupart de modèles, le temps est considéré sur un axe *linéaire* : les entités changent de façon uniforme et les transformations simultanées ne sont pas gérées. Ceci est absolument inadéquat quand des futurs / passés alternatifs sont possibles. Seulement le *modèle des processus* montre l'évolution par des arborescences de développement. Leur conformation par plusieurs niveaux verticaux (supérieurs et inférieurs) et par tâches horizontales distinctes permet de structurer les données et de gérer les produits soit au niveau d'objet simple, soit au niveau des composantes (sous éléments).
- *L'échelle de restitution.* Le seul modèle qui permet d'exprimer des changements d'échelle est celui basé sur les *Réseaux de Pétri*, car il est hiérarchique et multi-mesures. Le fait d'avoir des relations entre les événements à une échelle initiale et finale pour chaque étape permet de représenter l'objet ou l'ensemble d'objets à travers différentes résolutions (hautes – basses) par rapport au type d'échelle. On peut accorder au modèle un niveau d'information simplifié ou détaillé selon l'objectif de la représentation.
- *La formulation de requêtes.* Tous les modèles présentés supportent bien les requêtes simples ; en revanche, quand les requêtes spatiales et/ou temporelles sont complexes (par exemple pour décrire l'évolution des comportements des objets), seulement les approches visant à représenter les changements et échelles multiples peuvent donner une réponse adéquate. Tout particulièrement, le Réseaux de Pétri permettent de formuler des comparaisons entre éléments de tailles différentes.

3.3. Conclusions

Les édifices constituent un terrain d'analyse très complexe, donc la formulation d'une approche de modélisation spatio-temporelle spécifique aux besoins du domaine architectural est nécessaire. Dans ce chapitre, on a défini la terminologie de base concernant les changements du patrimoine historique : la notion dynamique de transition et celle statique d'état. Une telle taxonomie nous a permis de détailler les transformations des édifices et de définir les exigences de modélisation en patrimoine.

Ensuite, un état de l'art a montré les approches plus significatives et leur principaux avantages et inconvénients. Certaines des approches analysées semblent fournir partiellement des réponses adaptées aux exigences du domaine patrimonial. On concentre l'attention sur les aspects suivants :

La durée des étapes. Quand on parcourt l'évolution historique d'un bâtiment, on a tendance à représenter ses transformations par un ensemble d'étapes, mais au contraire beaucoup de changements qui le concernent ont une durée (par exemple, la planification et la construction d'une église peuvent absorber plusieurs années). Parmi les modèles représentant les changements, le modèle de graphes historiques décrit cet aspect, car il fait ressortir immédiatement les relations temporelles. De plus, ce modèle peut être couplé au modèle orienté objet, qui trace bien l'histoire de l'entité au travers d'un seul objet.

Les types de changements. Les nouvelles approches doivent supporter divers types de changement : de géométrie, de topologie et d'attributs. Cela est possible dans l'approche des *graphes historiques* à travers les types de transitions qui représentent les contraintes de cardinalité : création, altération, cessation, réincarnation, coupure/déduction et union/annexion et réaffectation. Dans ce cas, les états statiques sont représentés par des versions, les états dynamiques par des transitions, et le temps est considéré comme continu.

Les hypothèses multiples. En patrimoine historique plusieurs hypothèses sur un même artefact peuvent coexister. Toutefois, la plupart des approches sont inadéquates pour prendre ne compte des alternatives dans le passé ou le futur, car ils structurent le temps sur un axe linéaire⁸. La coexistence des hypothèses multiples liées à un même état temporel est comparable aux différentes alternatives de conception dans un modèle de processus d'ingénierie. L'ordre temporel basé sur une arborescence, utilisé dans les approches d'Ingénierie de Systèmes, est très adapté pour ce genre de problématique parce qu'un graphe spécifique est développé en fonction de chaque point de vue.

⁸ Le temps peut être structuré sur un axe cyclique, il peut être ramifié ou encore à perspective multiple.

4. Architecture globale de l'approche proposée

Les recherches des dernières années pivotent autour de la représentation de l'objet numérique et de l'intégration de son niveau géométrique avec un niveau sémantique. Cette problématique est au cœur du projet FOCUS K3D⁹ - Foster the Comprehension and Use of Knowledge intensive 3D media. Cette action de coordination vise à promouvoir la sémantisation et le traitement des formes 3D pour le partage et le codage de son contenu, et concerne quatre grands domaines d'application : celui de la médecine et la bio-informatique, des jeux et simulations virtuels, de la CAO/CAE et des produits virtuels, et enfin de l'archéologie et du patrimoine. Derrière cette mission se masque le besoin de produire des maquettes numériques qui puissent être réutilisables et exploitables. Dans le cadre de la conception des systèmes, cette vocation est déjà réalité : grâce à une maquette digitale (*Digital Mock-Up*¹⁰), les processus de conception et fabrication intègrent la création, la représentation, l'analyse, le contrôle et la simulation d'un modèle tout le long de son cycle de vie, jusqu'à la mise sur le marché de l'objet (Sun 2007; Döllner et al. 2000; Garbade & Dolezal 2007). Dans d'autres domaines tels que celui du patrimoine historique, cet objectif est consolidé mais plus difficile à réaliser. En effet l'association d'un modèle théorique à un objet patrimonial réel est incompatible avec les exigences d'étude du domaine patrimoniale (J.-Y. Blaise 2003). Toutefois, les éléments architectoniques ont une forme et un cycle de vie ; ils sont décrits par des caractéristiques physiques, des attributs temporels plus ou moins certains et parfois par des sources documentaires. Il est donc envisageable d'extraire des attributs capables de décrire plusieurs éléments ayant des caractéristiques en commun.

Ce chapitre se propose, après avoir fixé les préoccupations principales, de présenter l'approche globale basée d'une part sur la structuration sémantique spatiale et d'autre part sur la gestion de l'historique des édifices. Par la suite, la démarche méthodologique et l'environnement de programmation seront discutés.

⁹ **FOCUS K3D** <http://www.focusk3d.eu/>

¹⁰ **Digital Mock-Up** ou **DMU**, en conception des systèmes, est un modèle numérique généralement en 3D, qui permet la description d'un produit pour tout son cycle de vie. La maquette numérique est enrichie par l'ensemble des activités qui contribuent à la description du produit. Telle maquette numérique permet de visualiser la maquette assemblée mais aussi de mesurer, d'analyser, de simuler, de concevoir, de modifier le modèle et d'en connaître son cycle de vie.

4.1. Préoccupations retenues

Dans les chapitres précédents, les approches de restitution géométrique et les modèles de données spatio-temporelles ont mis en évidence les difficultés actuelles à restituer la géométrie des états passés et à représenter leurs évolutions. A partir des conclusions tirées sur ces deux aspects, nous isolons trois préoccupations essentielles pour la formulation de notre approche.

Restitution des états passés. Si, d'un côté, la collecte d'informations concernant l'état actuel d'un édifice patrimonial est riche et variée, d'un autre, les informations sur les états historiques passés d'un édifice sont difficiles à cerner. En effet, dans le premier cas la collecte d'informations peut se baser sur différentes données de terrain (telles que le relevé laser et l'acquisition photographique), qui offrent des informations métriques très élevées et permettent de restituer l'apparence visuelle de l'artefact. En revanche, quand il s'agit de représenter des états passés disparus, la représentation devient plus complexe : dans ce cas, la reconstruction morphologique se base sur l'interprétation des parties architecturales subsistantes et des sources documentaires ayant des qualités métriques réduites ou presque nulles. Un besoin important est alors celui de concevoir un système qui permette de qualifier la géométrie selon le niveau de fiabilité des sources et de représenter les différentes hypothèses autour de la même époque. La prise en compte des états passés alors rend nécessaire de définir des représentations opportunes en fonction des divers points de vue.

Structuration de la géométrie. Les évolutions des édifices au fil du temps sont parfois très nombreuses. Ceci rend nécessaire de structurer les maquettes 3D afin de distinguer les éléments géométriques qui subissent des modifications à chaque étape de l'évolution. Ce besoin répond à l'exigence de comprendre les transformations morphologiques réelles subies par les édifices, et non pas seulement les variations globales de leur volumétrie.

Visualisation des transformations. La prise en compte de plusieurs états historiques ouvre des questions sur la nature des relations entre les divers états. En effet, les édifices peuvent subir des transformations complexes et de nature variée qui parfois le mettent en relation entre eux. Par conséquent, il est important de décrire quelles transformations les édifices ont subi au fil du temps. L'historique des transformations doit pouvoir être consulté par un public varié afin de comprendre les évolutions réelles des sites patrimoniaux.

D'un point de vue technique, de telles préoccupations mettent en évidence un ensemble des difficultés :

- en ce qui concerne la modélisation géométrique des états passés, la nécessité de représenter des édifices à différents niveaux de détail en fonction du degré de confiance attribué aux sources documentaires ;
- en ce qui concerne la structuration, le besoin d'établir des critères de structuration en fonction de l'objectif ;

- en ce qui concerne la représentation, la nécessité de qualifier les éléments architecturaux en fonction de leur niveau de certitude, des attributs temporels, et enfin des attributs spatiaux.
- en ce qui concerne la consultation, toutes les représentations et ses attributs doivent être stockés et devenir accessibles dans une interface capable d'afficher les relations entre les diverses représentations au fil du temps.

4.2. Approche méthodologique

Notre approche démarre d'une méthode définie par De Luca (De Luca 2006) qui permet d'associer la sémantique à la forme. 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. La connaissance du cycle de vie d'un bâtiment étant nécessaire pour construire une maquette spatio-temporelle, la sémantisation spatiale n'est pas suffisante. L'objectif principal de cette thèse est donc d'intégrer un niveau de structuration sémantique avec un modèle capable de gérer, sauvegarder et représenter les modifications des édifices au fil du temps (De Luca et al. 2007; De Luca et al. 2008). Ces deux modèles sont illustrés par la suite.

4.2.1. Le modèle pour la description temporelle

Depuis longtemps, dans le domaine du patrimoine bâti et des SIG, on a considéré la manipulation des géométries spatiales comme décrites seulement par leur position et forme. Cela a permis de développer des processus interactifs qui gèrent des requêtes spatiales, pourtant les aspects temporels ont été souvent réduits à des attributs secondaires (C. Weber & Gançarski 2007; Breunig et al. 2002; Wang & D. Liu 2004). Or, si on considère qu'un changement quelconque dans l'espace implique le passage du temps t_0 à l'instant t_1 , on s'aperçoit que la notion temporelle joue un rôle essentiel dans la description des transformations. D'autant plus dans le cadre du patrimoine historique, où les relations réciproques des édifices peuvent se modifier au fil du temps. Les dernières recherches dans des domaines similaires commencent à considérer les transformations spatiales et temporelles comme des notions indissolubles. Ce principe est au cœur des études récentes dans le domaine de la géographie (Du Mouza & Rigaux 2000; Kavouras 2001; Pelekis et al. 2004; Debois 2003; D.J. Peuquet 1994; Cheylan 2007) et de l'archéologie urbaine (Lefebvre 2008; Rodier & Saligny 2007; Galinié et al. 2004).

4.2.1.1. Le système de notation

Dans le chapitre 3 on a abordé la problématique liée à la modélisation spatio-temporelle. Parmi plusieurs approches gérant les transformations spatio-temporelles (à ce propos voir le paragraphe 3.2), les graphes historiques de Renolen (Renolen 1999; Renolen 1997a; Renolen 1997b) constituent une approche orientée objet qui s'applique bien au domaine du patrimoine historique. Les types de transformations caractérisant les édifices sont bien représentables à travers ce système. Cette notation montre de façon très intuitive à la fois la durée de vie de chaque édifice et les relations entre les entités : elle constitue une aide à la compréhension des transformations.

D'autres systèmes peuvent décrire les évolutions, comme par exemple les diagrammes d'état. Pourtant l'interaction de plusieurs objets, comme est le cas d'une division, est mal exprimée dans ce système. En effet une division implique généralement la création d'un objet et l'altération d'un autre. De toute évidence, ces questions sont abordées dans la notation des graphes historiques. Nous avons modifié tel système de notation, conçu à l'origine pour les Systèmes d'Information Géographiques, en fonction des exigences spécifiques du patrimoine historique. En effet, trois facteurs conditionnent la représentation de cette notation à l'échelle patrimoniale par rapport à l'échelle géographique. Tels aspects sont détaillés dans les sous paragraphes suivants.

4.2.1.1.1. La nature des entités

D'un point de vue technique, la notation de Renolen est appliquée à des entités morphologiques souvent bidimensionnelles concernant la géographie du territoire (donc des aires). En revanche, dans un système patrimonial, les évolutions concernent plutôt des entités morphologiques tridimensionnelles (des volumes). Au niveau conceptuel, la gestion d'aires ou des volumes n'implique pas des variations substantielles, toutefois dans un cadastre l'aire globale reste constante donc les transformations sont bien distinctes ; dans l'espace tridimensionnel, le volume au fil du temps peut varier de façon importante et telles variations sont plus difficilement détectables et appréciables. Bien que les systèmes géographiques prennent en compte les changements volumétriques, dans la plupart de cas il s'agit de transformations graduelles liées à la notion de *masse* (par exemple l'évolution de la masse d'un glacier, le calcul des litres d'eau inversés dans la mer, le volume de bois brûlé dans un incendie, etc.). En revanche en patrimoine historique les volumes sont composés d'entités géométriques hiérarchiquement structurées. Les transformations donc parfois sont complexes et confondues. Par exemple une réhabilitation peut entraîner le changement de mobilier, la création d'ouvertures, la mise en sécurité, l'isolation acoustique et thermique, ou encore la modification de l'espace intérieur. Ceci comporte non seulement une augmentation de la masse mais le déplacement des matériaux, des variations volumétriques et des changements de fonction.

4.2.1.1.2. La nature des transformations

La notation de graphes historiques décrite dans le paragraphe 3.2 par (Renolen 1997b) prend en compte les 7 types de transformations suivants (Figure 14) : création, démolition, union, division, altération, réincarnation, réaffectation. Toutefois d'autres transformations peuvent affecter le patrimoine historique : les édifices peuvent être déplacés (avec destruction ou pas de l'artefact), subir des dégradations, ou encore être masqués par des événements naturels (ensablement, enterrement) ou par l'homme. Nous avons donc enrichi cette notation pour répondre aux exigences patrimoniales. La représentation graphique (Figure 20) illustre les transformations suivantes pour des édifices :

- Six *transformations primaires* (création, démolition, union, division, variation, reconstruction) permettent la description des dix types de changement.
- Quatre *transformations secondaires* (la décadence, l'enterrement, le déplacement et la réaffectation) sont déduites à partir des transformations primaires.

A titre d'exemple, un état de décadence ou la dégradation d'un édifice est une lente et constante variation qui dans la plupart des cas amène le bâtiment à la démolition. Par conséquent, sa représentation graphique est évidemment la collecte d'une succession d'états de transition et d'existence. La réaffectation est tout simplement la schématisation d'unions et divisions consécutives. En revanche, deux nouvelles expressions graphiques ont été créées pour le déplacement et l'enterrement qui ne sont pas considérés dans le système original. Comme de telles actions n'impliquent pas une modification de la forme de l'objet, à un niveau graphique, des traits sont simplement rajoutés à la métaphore graphique utilisée dans les six transformations primaires.

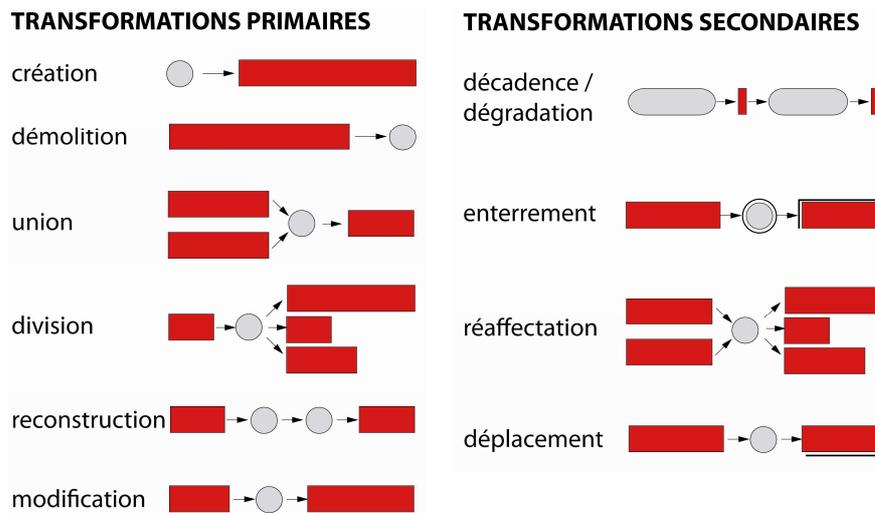


Figure 20. Représentation des typologies de transformations en patrimoine historique.

(Dudek & J.-Y. Blaise 2008) définissent d'autres types de transformations des édifices : notamment l'abandon, l'extinction, l'hibernation, l'internement et l'anesthésie segmentale. Toutefois, nous pensons que tels changements peuvent être reconduits aux dix transformations de base de notre système. En effet, l'abandon d'un édifice comporte des dégradations et l'extinction de l'édifice comporte sa suppression ; enfin l'hibernation (l'acte de fermer l'accès d'un artefact temporairement), l'internement et l'anesthésie segmentale peuvent être reconduits à des simples modifications.

Enfin, d'autres changements affectent les bâtiments sans impliquer nécessairement une transformation de la forme : les changements de *fonction*, *d'identité* et de *propriétaire*. Tels aspects sont illustrés par des symboles (i/f/p) superposés au système graphique en proximité de la transition ou de l'état (Figure 21).

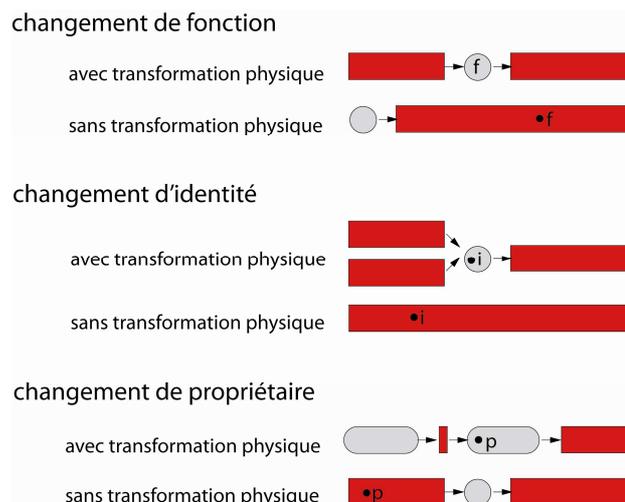


Figure 21. Représentation des changements de fonction, d'identité et de propriété en patrimoine historique.

4.2.1.1.3. La durée des transformations

Comme chaque changement est défini par une certaine durée, cette approche permet de visualiser différents types de changement (Figure 22) : les changements instantanés, correspondant aux événements ayant durée nulle (par exemple un changement de propriété) sont représentés à l'aide de cercles ; les changements graduels sont décrits à l'aide de rectangles arrondis de longueurs différentes selon l'intervalle de la transformation. Si la transformation est progressive sur une très longue période, l'état de variation est interrompu par des rectangles.

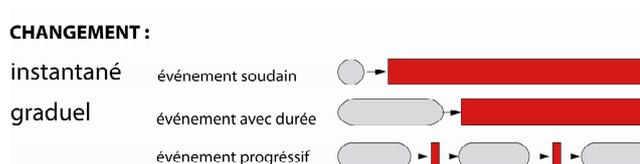


Figure 22. Types de changements : instantanés et graduels (de durées différentes).

4.2.1.2. Modélisation des états et des évolutions

A titre d'exemple de l'application des graphes, on propose d'analyser la Figure 23. Les graphes explicitent les transformations subies par certains bâtiments parmi ceux de Carcassonne selon l'historien Guyonnet, entre le XIIe et le XIVe siècle. En haut, les images montrent les six transitions historiques qui se sont déroulées selon cette hypothèse. En bas, les graphes illustrent tout particulièrement la durée de vie des éléments mis en jeu (à travers des rectangles) et la durée des leurs transitions (à travers des rectangles arrondis).

Pour clarifier la notation, analysons le logement en rouge (numéro 5). Il a été bâti selon Guyonnet à la fin du XIIe siècle comme il est représenté par la transition T3 ; ensuite au début du XIIIe siècle (T4) on lui a rajouté des créneaux. Après, vers la

moitié du XIII^e siècle (T5), les créneaux ont été démolis et une partie de ce bâtiment a « changé de fonction » : destiné aux galeries (7), il a été annexé aux galeries existantes (6). Enfin, vers la moitié du XIV^e siècle (T6), une portion des galeries a été démolie et le logement 5 a été agrandi en prenant possession de l'ancienne galerie (7).

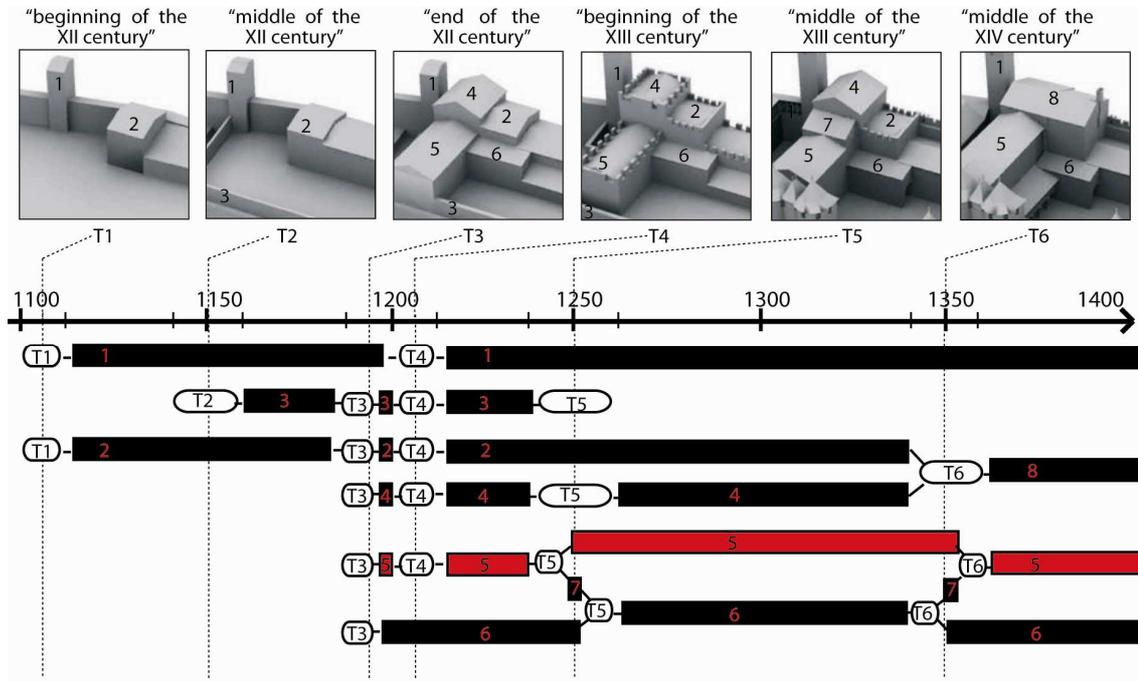


Figure 23. Description des transformations concernant certains édifices à Carcassonne à travers la notation graphique de Renolen. Les rectangles arrondis représentent les durées des transformations ; les relations entre rectangles représentent les types de transformations.

4.2.1.3. Les résolutions

De manière générale, la limite d'un système de représentation statique est que la représentation est constante à toutes échelles spatiales et temporelles. De ce fait, il est important de représenter les événements à une échelle conforme pour ne pas alourdir le système quand il n'est pas nécessaire et pour ne manquer pas de données essentielles à la compréhension. Les transformations concernant les bâtiments seront donc formalisées selon différentes résolutions spatiales et temporelles. De ce fait, le cas décrit auparavant à l'aide des graphes historiques (Figure 23) peut être représenté à travers des résolutions¹¹ variées. Les diverses résolutions permettent de visualiser les données en fonction de l'échelle de représentation, pour simplifier ou compliquer la visualisation en fonction des requêtes effectuées. Les exemples qui suivent illustrent les divers types de résolutions envisageables et le processus d'abstraction d'informations possible à partir de la représentation par graphes.

4.2.1.3.1. Les résolutions spatiales

Si l'on considère le niveau spatial, chaque *graphe* peut représenter concepts divers. Les rectangles peuvent représenter chacun des édifices, comme c'est le cas en

¹¹ Ou *granularités*. Voir Annexe B pour la définition.

Figure 23 et Figure 24B. En particulier, cette dernière figure décrit les évolutions des édifices 2 et 4. Toutefois, selon un niveau majeur de granularité, chaque rectangle pourrait symboliser les différentes parties constituant un bâtiment. Ce cas est mis en évidence en Figure 24A : dans cette variante, chaque rectangle représente les murs, les toits et les créneaux appartenant au même édifice (logement 2) et concernant différentes époques temporelles. Enfin, selon un niveau inférieur de résolution, chaque rectangle peut représenter un groupe d'édifices (Figure 24C). Pour résumer, différentes granularités spatiales peuvent s'appliquer aux mêmes entités en fonction de l'objet de l'analyse : depuis les groupes d'édifices jusqu'aux composantes de chaque édifice, la granularité sera de plus en plus élevée.

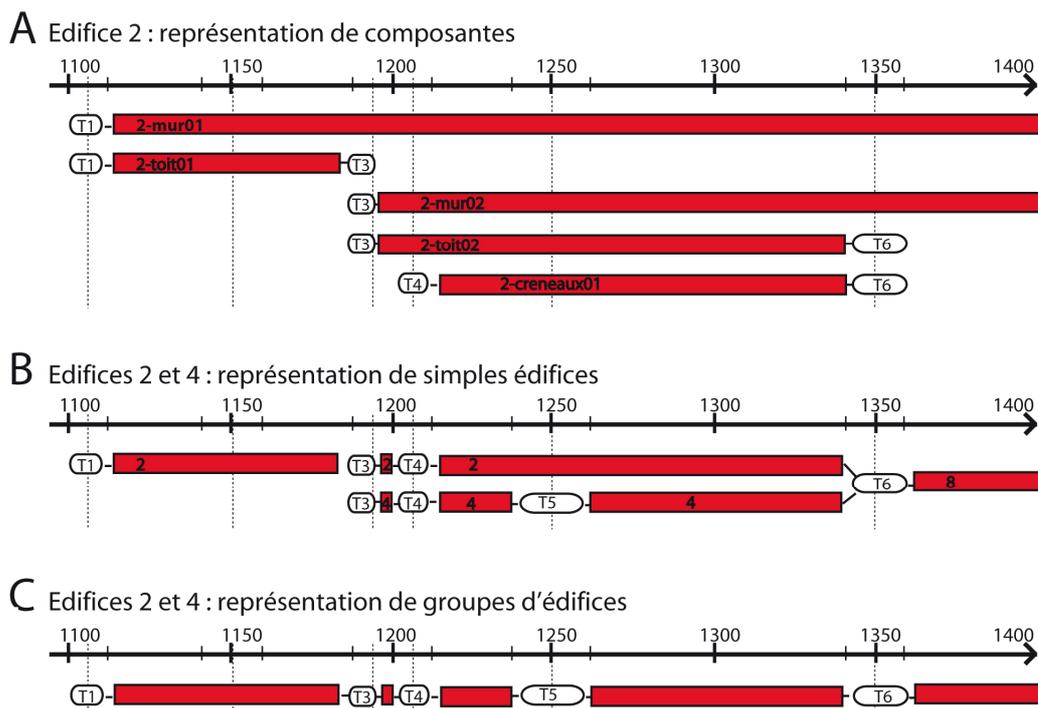


Figure 24. Différentes résolutions spatiales à Carcassonne : a) représentation des différentes parties d'un édifice ; b) représentation de chaque édifice ; c) représentation de groupes d'édifices.

4.2.1.3.2. Les résolutions temporelles

De la même façon, l'affichage des variations dans le temps est géré en fonction de la résolution. De ce fait, chaque transition (rectangle arrondi) peut concerner un et un seul changement de l'état d'un édifice (Figure 25A). Toutefois, si la dimension de l'analyse ne permet pas l'affichage de toutes transformations, un rectangle arrondi peut représenter plusieurs changements multiples et complexes : ceci est le cas des transformations très proches entre elles, partiellement chevauchées et qui se sont passées dans un créneau temporel très court. La Figure 25 montre différentes résolutions temporelles : à une granularité temporelle majeure toutes les transitions sont représentées (Figure 25A) ; en revanche si le niveau de granularité est réduit, plusieurs transitions sont représentées par le même rectangle arrondi (Figure 25B, Figure 25C). Pour résumer, différentes résolutions temporelles peuvent être

visualisées en fonction de la « taille temporelle » de l'analyse. La granularité temporelle devient une variable en fonction de l'ampleur de l'analyse. Tout particulièrement, les cas B et C en figure montrent comment l'information est traitée. Le cas B en effet montre qu'à Carcassonne autour du 1250, le bâtiment 5 a d'abord subi une division et ensuite une de ses parties a été annexée à un deuxième bâtiment. A une résolution temporelle inférieure (cas C), cette évolution est simplifiée et représentée comme une réaffectation. Le système permet donc de concilier la vue globale et les détails : en fonction de la résolution spatiale et temporelle ce procédé permet d'afficher une représentation graphique à laquelle est rattaché un niveau sémantique.

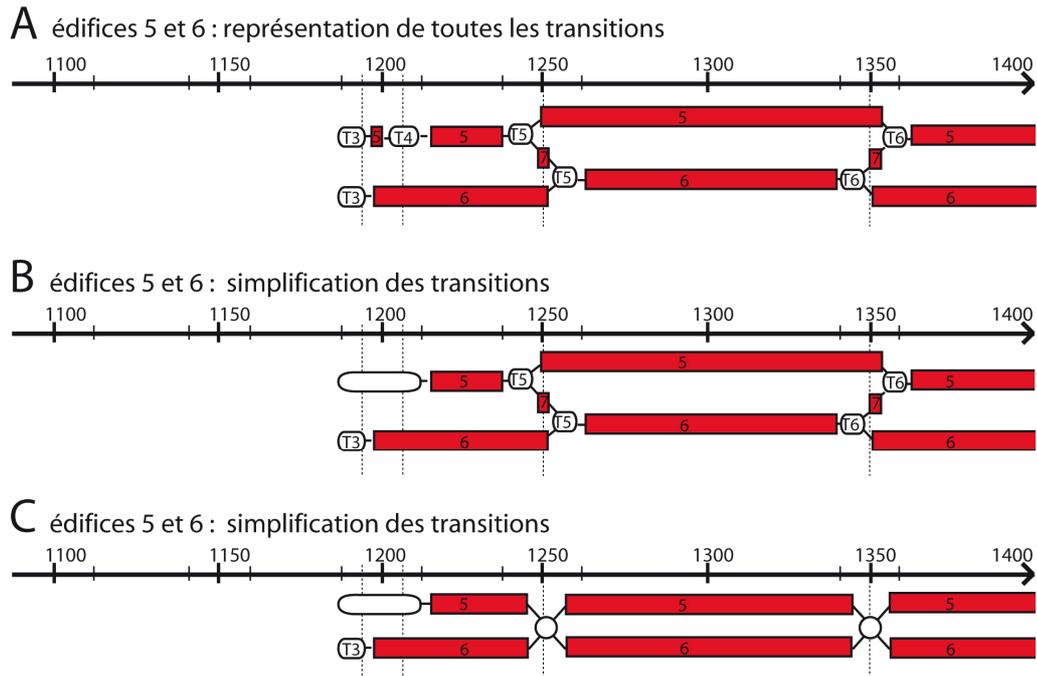


Figure 25. Diminution progressive de la granularité temporelle appliquée à deux édifices à Carcassonne : a) représentation de toutes les transitions ; b) simplification des transitions ; c) simplification ultérieure des transitions : l'union et la division de deux édifices sont représentés par une réaffectation.

4.2.1.3.3. Un exemple d'application

L'application de divers types de visualisation est encore plus significative sur des complexes d'édifices patrimoniaux. On prend comme support le cas de la Cour d'Honneur de la Sorbonne à Paris. La Figure 26 illustre cette situation. Cette zone est décrite par l'ensemble d'édifices qui se sont constitués autour d'une cour de périmètre défini. On se demande quand ce site est né. Certains édifices ont été construits sur une période d'environ un an chacun (montré avec les transitions), alors qu'il faut plusieurs années pour construire toute la zone. L'image montre que certains édifices ont été construits bien plus tard que les autres : la représentation par groupes d'édifices décrit deux états intermédiaires pendant lesquels les modifications du site se sont produites.

Chaque *macro-variation* correspond donc aux changements qui sont associés aux moments où le premier édifice était en construction jusqu'à quand le dernier édifice inclus dans la zone a été fini. Une représentation simplifiée par groupes d'édifices permet de tracer graphiquement les trois états qui se sont déroulés à la Sorbonne et qui ont été validés par les historiens : l'état Sorbon (pour lequel on dispose seulement d'hypothèses), l'état Richelieu, et enfin l'état actuel.

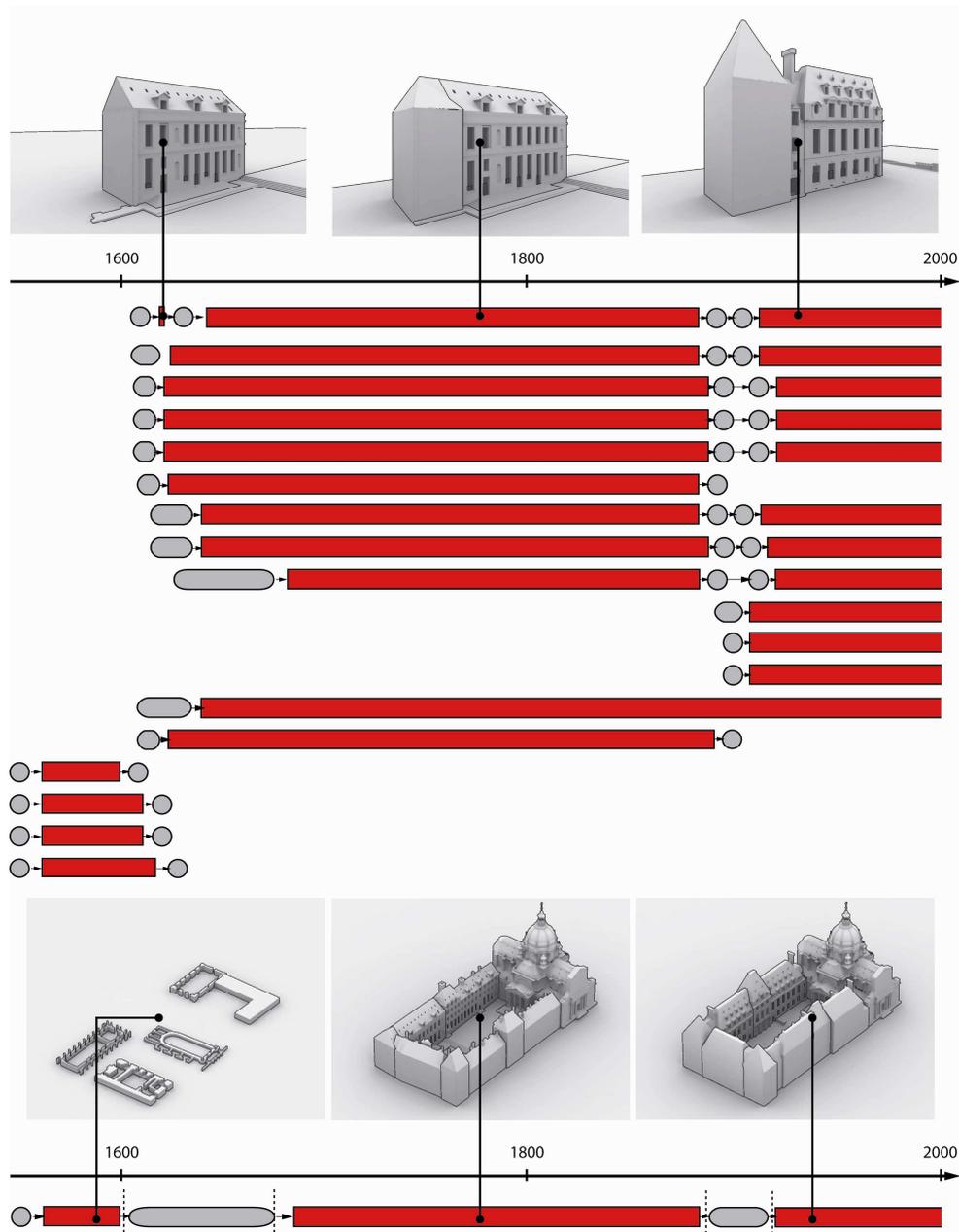


Figure 26. Application des graphes historiques à la Cour d'Honneur de la Sorbonne, Paris. La représentation de l'ensemble architectural permet de décrire les trois grandes étapes qui se sont déroulées.

4.2.2. Le modèle de structuration spatiale

Ce paragraphe aborde deux aspects fondamentaux dans le domaine de l'architecture : la structuration spatiale et la relation entre l'espace et le temps. La description des bâtiments est une tâche complexe et délicate dans la formalisation spatio-temporelle. D'une part, les édifices sont des entités complexes, constitués de nombreux éléments fonctionnels, chacun ayant ses caractéristiques spécifiques, son matériel propre et son usage. D'autre part, quand les édifices ont des cycles de vie compliqués au fil du temps, le type de structuration est conditionné par la fragmentation temporelle. En effet, au fur et à mesure que des stratifications temporelles se superposent, la complexité augmente : il se pose donc le problème de comment représenter l'évolution morphologique. La façade Sud de la Cours du Midi du Château Comtal (Figure 27) à Carcassonne révèle que des nombreuses évolutions se sont succédées au fil du temps. De plus, la complexité des évolutions rend difficile de structurer de façon cohérente les maquettes tridimensionnelles spatiales selon le découpage temporel. Par conséquent, la façade ne peut pas être considérée comme une entité unique. Le temps devient la quatrième dimension dans la structuration temporelle (Hetherington & Scott 2004) : si une forme est matérialisée à un moment temporel défini, elle peut toutefois perdurer dans le temps de façon très variable. Elle peut être réduite en des nombreux fragments au fil du temps, chacun ayant une « durée de vie » différente. De plus, chaque fragment peut subir des ultérieures modifications.

Cette section aborde donc la structuration spatiale de la maquette virtuelle en fonction de la valeur sémantique des entités pour permettre des restitutions multiples. Ces réflexions démarrent à partir de la thèse de (De Luca 2006) qui établit comment transformer des informations générales en données spatiales structurées et fidèles sur les bâtiments. Cette solution implique trois phases : premièrement la classification des composantes d'un édifice selon le point de vue choisi, deuxièmement la décomposition morphologique de l'édifice et troisièmement la création d'associations entre concepts à l'aide des graphes de description.

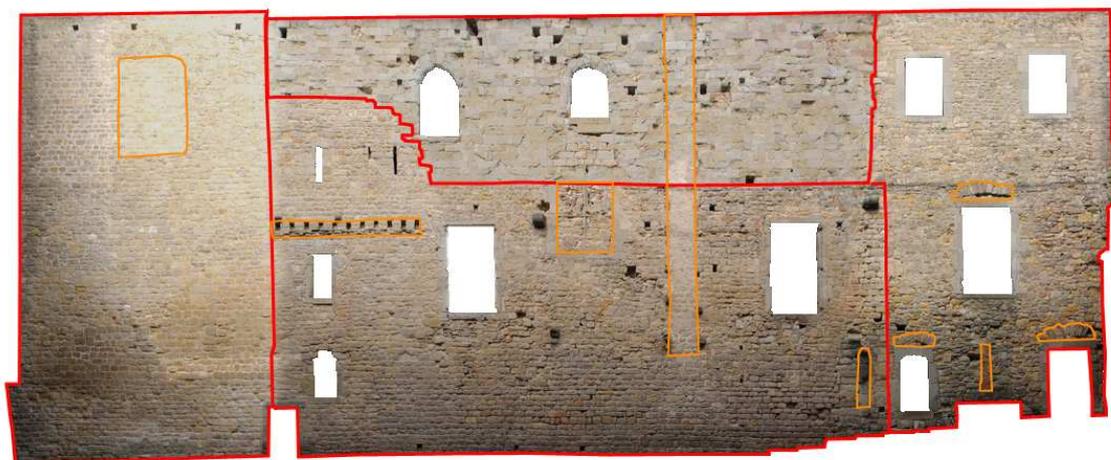


Figure 27. Façade sud de la Cour de Midi dans le Château Comtal de Carcassonne. Diverses stratifications temporelles sont lisibles sur l'orthophoto de la façade.

4.2.2.1. La description sémantique

Cette approche s'appuie sur une représentation symbolique des relations hiérarchiques établies entre les éléments de la composition architectonique. Ce système de notation permet de structurer la composition en fonction d'un point de vue, sur différents niveaux. Les données sont donc organisées dans une hiérarchie descendante ayant 3 niveaux (Figure 28) :

- les *groupes*, qui représentent des complexes d'édifices, les édifices et leurs composantes majeures (sol, murs, ouvertures, toits, etc.) ;
- les *entités*, qui représentent les éléments architecturaux caractérisées par un aspect fonctionnel et temporel de la maquette 3D ;
- les *repères*, des aspects ou des éléments caractéristiques appartenant aux entités.

Ces symboles sont créés grâce à une procédure automatique (développée Nubes Forma) qui permet d'associer une entité morphologique (nœud) à chaque sous-élément, et ils sont positionnés en correspondance du barycentre de chaque entité ou groupe d'entités. Ce modèle a été choisi parce qu'il permet de structurer hiérarchiquement les éléments en fonction d'un point de vue et il résulte particulièrement adapté à la structuration en fonction du temps. Ces graphes accordent une valeur sémantique à la représentation morphologique de l'objet architectural.

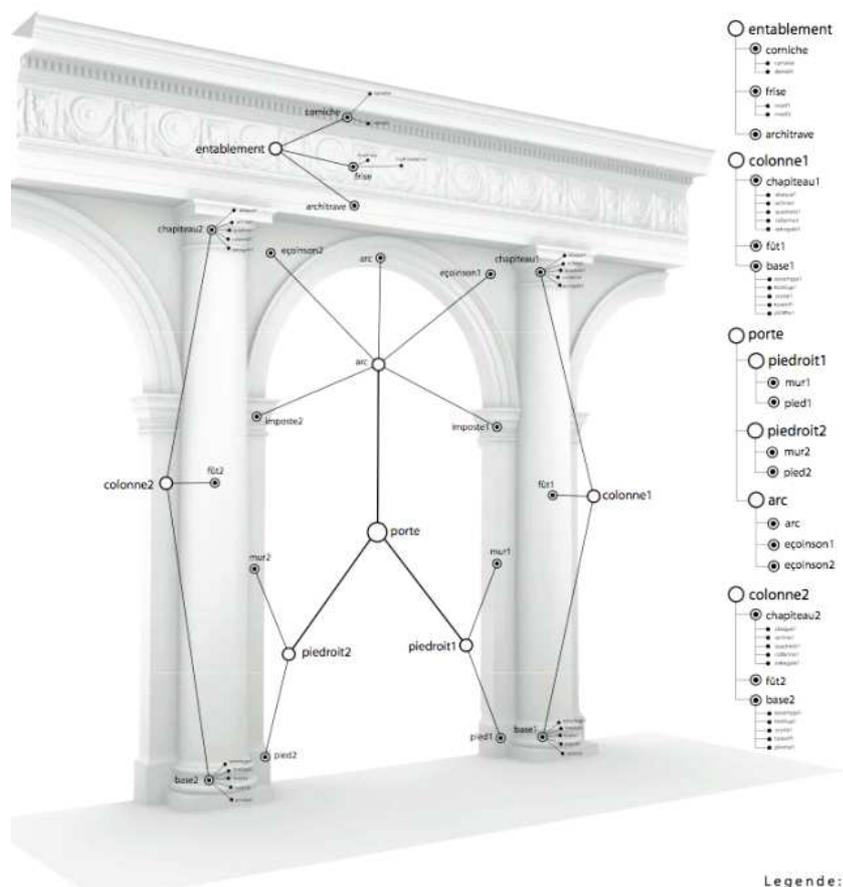


Figure 28. Hiérarchie de graphes de relation (De Luca 2006).

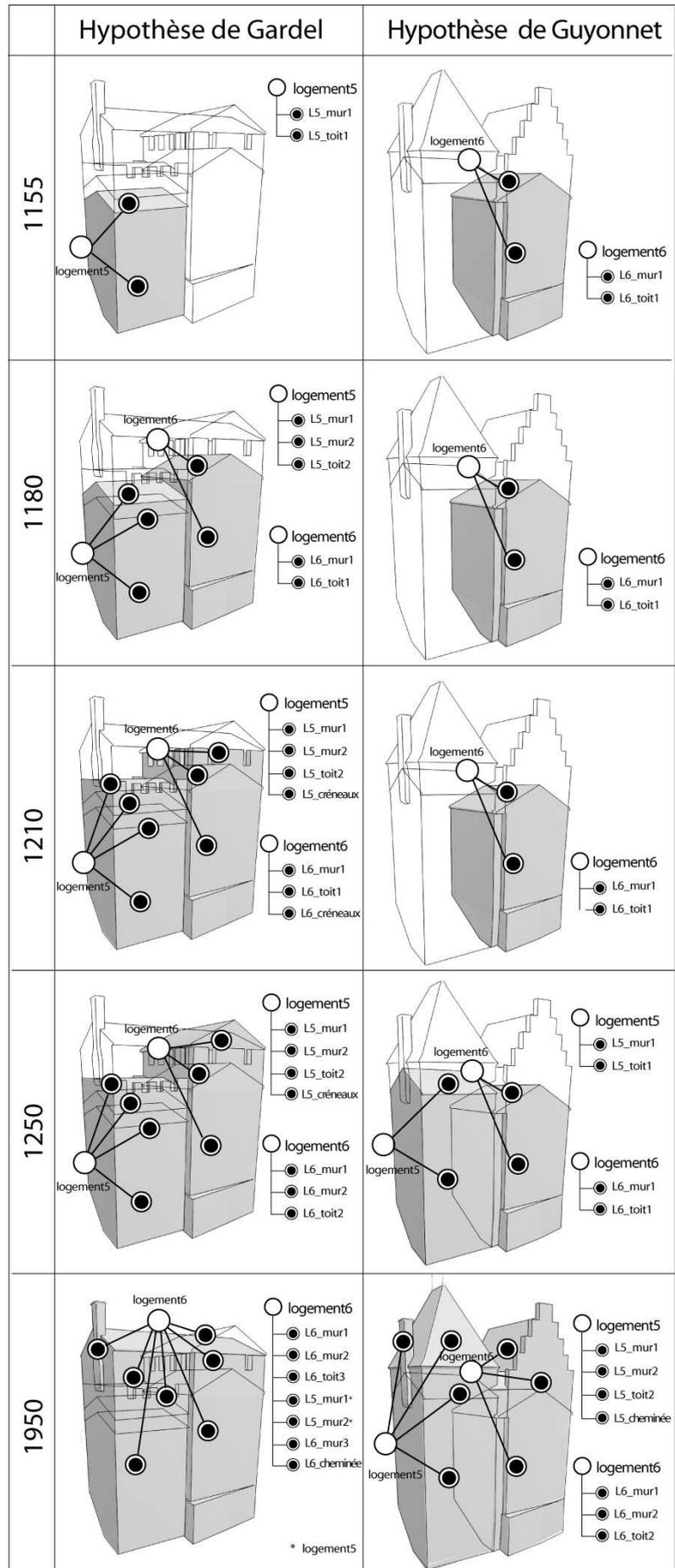


Figure 29. Les deux restitutions hypothétiques de Guyonnet et Gardel pour deux logements/tours à Carcassonne. Schéma des graphes de relations qui se croisent entre les éléments.

4.2.2.2. Organisation morphologique en fonction du temps

Afin de restituer les évolutions du patrimoine historique, la dimension temporelle doit être intégrée dans l'approche de structuration de la maquette 3D. Cela implique une *réorganisation* de la structure, c'est-à-dire une partition appropriée de la maquette qui prenne en compte les variations au fil du temps. De ce fait, le point de vue choisi pour classifier et découper la maquette sera celui du temps. Les graphes sont donc ancrés aux éléments structurés selon un découpage temporel. Tout particulièrement, chaque entité, organisée selon la hiérarchie exposée auparavant, est rassemblée autour d'un concept (groupe) représentant le bâtiment à une époque temporelle définie. Par conséquent, les entités temporelles sont visualisées ou masquées selon leur existence à l'époque ou la date choisie. A titre d'exemple, la Figure 29 montre les graphes de relation dans les différentes restitutions hypothétiques (selon Guyonnet et Gardel) de deux édifices de Carcassonne pendant 8 siècles. En 1180 selon Guyonnet le bâtiment 5 était composé par trois entités architecturales : un premier volume de murs édifié vers la moitié du Xe siècle, un deuxième groupe de murs rajoutés vers la seconde moitié du Xe siècle et un toit. Suite à des transformations, au début du XIe siècle la maison a été fortifiée et des créneaux ont été rajoutés. Une nouvelle entité morphologique ayant une caractérisation temporelle est donc affichée : l'entité *créneaux*. Au fil des siècles, le bâtiment 5 a été ensuite uni au bâtiment 6 et ils ont généré au début du XXe siècle un nouvel édifice constitué par des nouvelles entités morphologiques et d'autres d'époques précédentes.

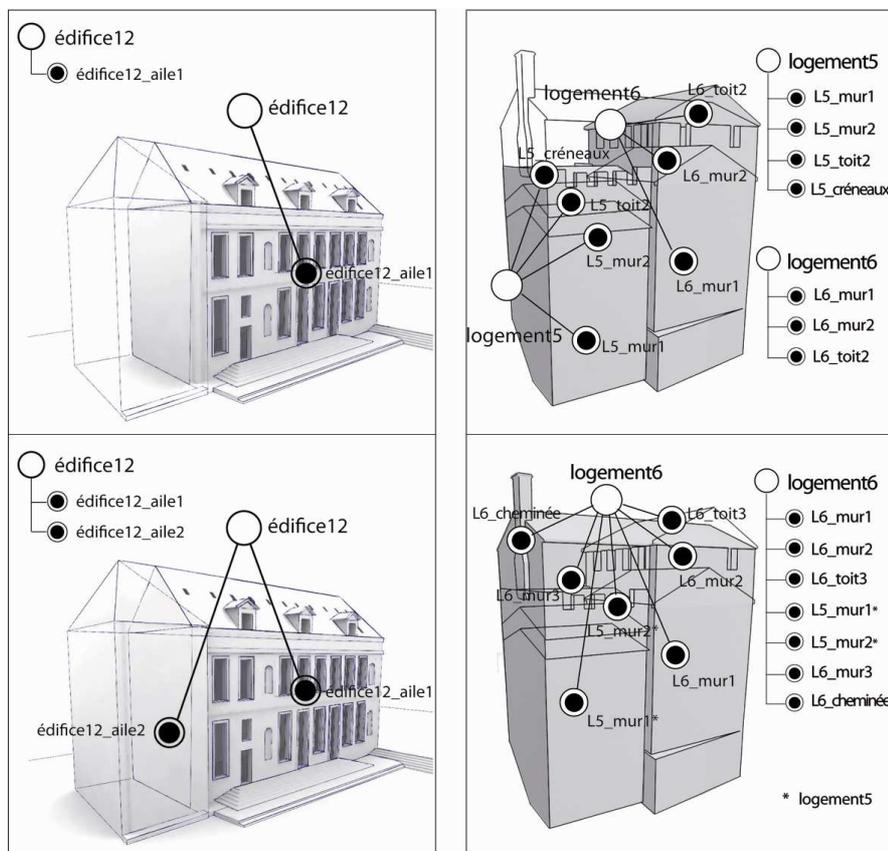


Figure 30. Entités temporelles dans le cas, à gauche, de la Sorbonne (macro-transformations) ; à droite, de Carcassonne (micro-variations).

4.2.2.3. Granularité spatiale

L'organisation temporelle varie en fonction de l'objectif de description. Toutefois, selon le cas, il sera préférable de subdiviser la maquette 3D en plusieurs concepts ou de garder son intégralité. En effet, les transformations peuvent attendre divers niveaux de la morphologie : l'édifice entier ou plutôt des composantes morphologiques précises. Dans certains cas, la morphologie de l'édifice n'est pas particulièrement touchée et les transformations concernent les édifices entiers (*macro-transformations*) : ils ont été construits, détruits, reconstruits, ou agrandis (Figure 30a). En revanche d'autres fois (Figure 30b), les transformations ont inclus aussi des variations mineures au niveau des composantes fonctionnelles (toits, murs, fenêtres, portes, etc.) et donc à une plus petite échelle (*micro-transformations*).

4.3. Démarche globale

Sur la base des modèles spatial et temporel décrits auparavant, nous proposons la démarche pour la restitution et structuration des états passés. Pour concevoir une approche méthodologique complète de restitution 3D d'édifices historiques, trois phases principales sont intégrées :

- construction d'un modèle géométrique des états historiques sur la base, à la fois de données de terrain, et de sources historiques ;
- structuration sémantique du modèle 3D pour permettre l'organisation des représentations au fil du temps, qui prenne en compte la multiplicité des restitutions hypothétiques possibles sur un même site ;
- enrichissement du modèle géométrique à travers divers attributs qui qualifient le niveau de fiabilité de l'entité restituée, sa valeur hypothétique ou certaine, l'époque temporelle d'existence et les transformations subies.

Pour chaque phase, l'approche s'appuie sur l'idée que le processus de restitution des états passés est délicat et qu'il est nécessaire d'exploiter la connaissance des formes architecturales pour l'interprétation et la restitution des formes. En effet, d'une part les formes architecturales classiques sont connues et des nombreux traités d'architecture les ont documentées à partir du 1er siècle av. J.-C. D'autre part, la restitution tridimensionnelle des états disparus, effectuée à partir de fouilles et de l'iconographie, laisse un espace important à l'interprétation basée sur l'analogie avec d'autres sites et à la déduction à partir de formes incomplètes.

Cette approche ne présente pas en détail la phase d'acquisition de données sur le terrain. Cette étape ouvre des problématiques différentes concernant les supports métriques et visuels, qui ne sont pas traités dans ce contexte. En effet, dans le panorama des restitutions d'états passés, l'acquisition des données de terrain est une partie réduite par rapport à la grande problématique liée à la restitution des états disparus.

L'approche est donc organisée comme suit :

Le **processus de modélisation** décrit la reconstruction des éléments géométriques en se basant sur l'iconographie existante et se base sur :

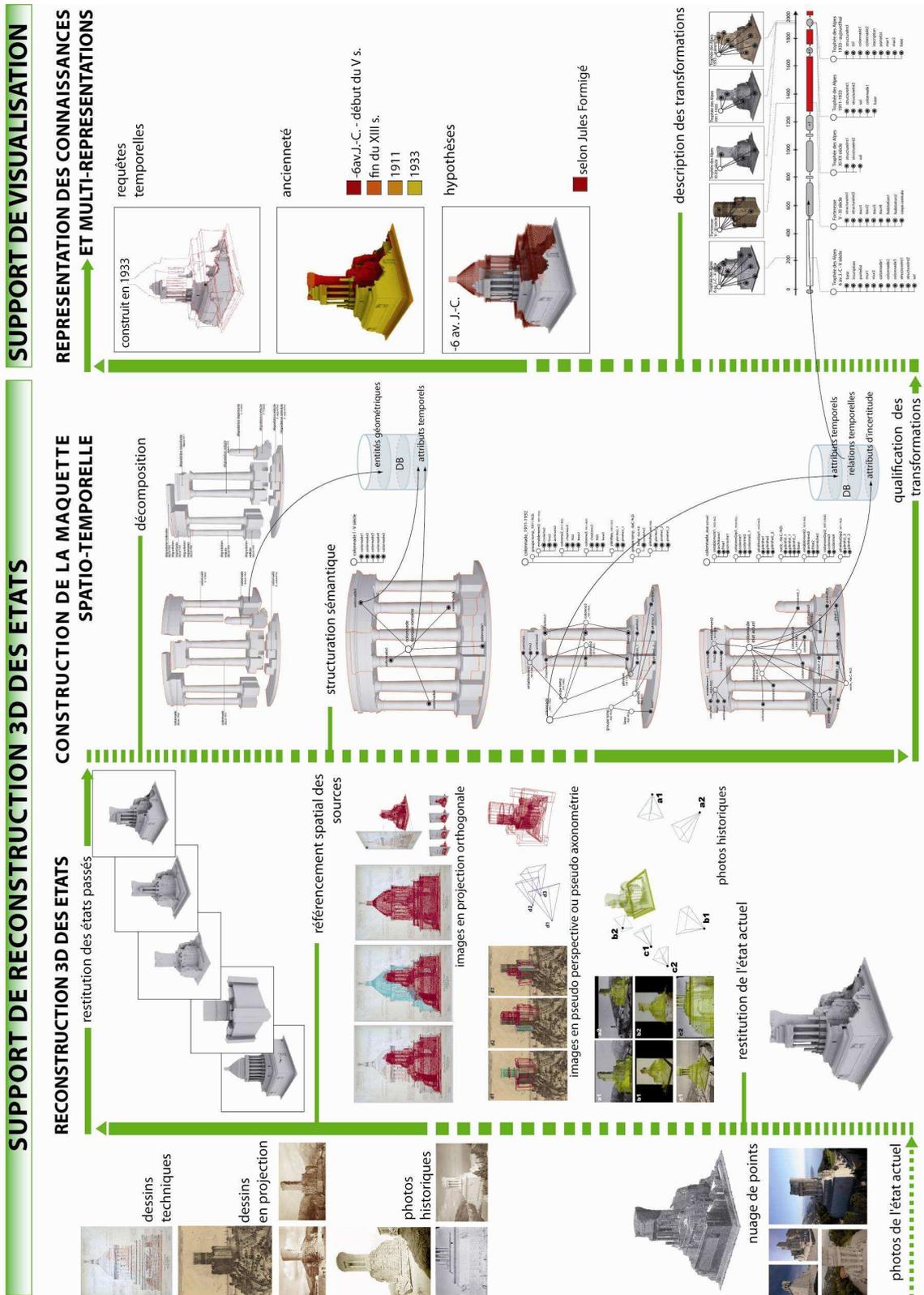


Figure 31. Schéma général de l'approche proposée.

- la restitution d'un état (actuel ou passé) qui soit structuré en fonction d'un point de vue spécifique ;
- le référencement d'images dans la scène 3D (les sources iconographiques comprennent les photos historiques, les dessins techniques, les représentations en projection orthogonale, les peintures en perspective, en pseudo perspective ou en pseudo axonométrie) ;
- la construction d'un modèle géométrique des états passés à partir des sources historiques et enrichissement visuel éventuel (si les sources le permettent).

Le **processus de structuration spatio-temporelle** permet d'organiser les représentations autour de la structuration sémantique en fonction du temps. Il repose sur :

- le découpage de la morphologie en fonction du point de vue temporel ;
- pour chaque état historique, la structuration hiérarchique des éléments en fonction de la décomposition morphologique ;
- la distribution dans le temps des transformations concernant le domaine patrimonial et l'identification des éventuelles corrélations entre divers artefacts ;
- la qualification des éléments selon des attributs spatiaux et temporels choisis en fonction des connaissances à partir des sources iconographiques et documentaires ;
- la qualification des attributs de relation désignant les transformations morphologiques au passage d'une étape à la suivante ;
- la qualification des incertitudes sur la morphologie des éléments architecturaux.

La **représentation des connaissances** permet d'organiser les restitutions en fonction des aspects suivants :

- la représentation des états temporels à travers la comparaison des états temporels ;
- la visualisation des diverses hypothèses de restitutions ;
- la visualisation des diverses incertitudes.

L'approche proposée est actuellement en cours de développement dans un outil implémenté à l'aide du langage Mel (Maya Embedded Language).

4.4. Environnement de programmation

Pour créer une maquette informatique structurée en fonction du temps, nous utilisons un environnement de programmation qui doit permettre de gérer les aspects suivants :

- Création et modification d'entités géométriques telles que points, surfaces et polyèdres ;
- Création et modification de groupes reliant diverses entités ;
- Création et modification d'attributs rattachés à divers niveaux de la géométrie (entités ou groupes) ;
- Création de fonction pour la gestion et la visualisation des évolutions des géométries au fil du temps ;
- Création d'une procédure pour la visualisation des états d'existence de chaque entité morphologique au fil du temps ;
- Interface utilisateur pour la gestion du processus de structuration du modèle en fonction du temps ;
- Exportation des géométries et attributs vers une base de données.

A partir de ces exigences, nous avons choisi Maya¹² parmi les diverses solutions envisageables. En effet, d'une part le langage Mel associé permet la gestion complète de ces aspects, d'autre part, le travail se situe en continuité avec un environnement informatique développé par De Luca (De Luca 2006) en langage Mel au sein du laboratoire MAP, appelé *Nubes Forma*. Cet outil est une solution intégrée de restitution tridimensionnelle d'édifices patrimoniaux à partir de l'acquisition conjointe par balayage laser 3D et photographie numérique.

4.4.1.1. Le langage Mel

Maya permet d'exploiter ses fonctionnalités grâce à plusieurs langages de script : MEL (Maya Embedded Language), un langage interprété de script propriétaire conçu après Unix ; Python, langage de programmation moderne rajouté récemment à Maya qui offre les mêmes accès aux commandes. De plus des API (Application Protocole Interface) C++ permettent la gestion des fonctionnalités. Une grande partie du logiciel (dont son interface) est programmée en Mel, le reste en C++.

Les commandes Mel concernent les tâches suivantes :

- *Fonctionnalités générales*. Elles comprennent les commandes pour la customisation de l'interface, la création d'attributs, la gestion de l'affichage, la manipulation, la sélection des entités.
- *Fonctionnalités de langage de script*. Les langages MEL et Python permettent de reconfigurer l'interface, de produire des applications et des procédures

¹² <http://www.autodesk.fr>

personnalisées. Les scripts peuvent être reconnus par un navigateur Web externe grâce au plug-in du navigateur Web de Maya.

- *Fonctionnalités de modélisation.* Une gamme d'outils de modification de la géométrie créée à partir de courbes (B-splines, Bezier) et de surfaces (Nurbs, polyèdres, subdivision) permettent diverses opérations comme enfoncer, couper, biseauter, réaliser une extrusion ou combiner des surfaces.
- *Fonctionnalités de rendu.* Divers outils permettent de créer et de manipuler des cameras, des sources de lumière, et de rattacher les textures aux entités. Des algorithmes plus complexes permettent des effets de rendus et la création automatique d'effets complexes d'ombrage.
- *Fonctionnalités d'animation.* Un large éventail d'animations est possible par « keyframe » et par procédures, qui peuvent se baser sur un ensemble de contraintes (parent, de point, d'objectif, d'orientation d'échelle, de géométrie, de normale, de tangente et de vecteur).
- *Fonctionnalités de système.* Il est possible de contrôler le dialogue avec le système d'exploitation, des applications externes ou un navigateur web, de contrôler l'entrée et la sortie des données, l'installation du logiciel et la suppression des commandes non valides.

De façon générale, le langage Mel permet d'avoir accès à la création d'interfaces (création de fenêtres, de boutons...) et à toutes les fonctions du logiciel. L'interface utilisateur de Maya est construite en utilisant des scripts qui exécutent la commande Maya. Comme Python est un ajout récent à Maya, la majorité de scripts via l'interface utilisateur sont écrits en MEL. Maya a une architecture basée sur les commandes pour le traitement de toutes ses fonctionnalités. Les commandes pour l'ensemble des fonctionnalités sont accessibles à travers le langage de script des commandes liées à l'interface utilisateur de Maya (menus, outils, boîtes de dialogue et toutes interactions avec Maya). De plus, il est possible de rentrer explicitement des commandes dans les langages de script supporté par Maya. Chaque commande a plusieurs arguments (*flags*) qui établissent la façon dont la commande est exécutée. Les arguments et leurs valeurs implicites ou explicites sont requis pour exécuter une commande. L'environnement de programmation offre diverses possibilités (Gould 2002) :

Customisation. L'interface graphique de Maya (*Graphical User Interface*) est entièrement écrite et contrôlée en Mel. Ce langage permet de créer, éditer, effacer tous les éléments de l'interface graphique : il permet donc à l'utilisateur de remplacer l'interface standard et de créer sa propre interface contenant les procédures et fonctions conçues en fonction d'objectifs spécifiques. De plus, grâce à ce langage il est possible de réduire la complexité de l'interface en fonction des outils conçus, et de changer les options internes de Maya sur la base d'un projet ou de l'ensemble du système.

Intégration. Dans notre environnement de production, Maya n'est pas le seul produit logiciel utilisé. Seulement certaines caractéristiques de Maya sont exploitées en patrimoine historique, et il est nécessaire d'importer les données vers Maya et de les

exporter vers d'autres applications. Comme il est possible d'accéder à toutes les données gérées par le système, le langage Mel permet d'extraire des entités les informations nécessaires, et de le convertir sous une forme qui soit facilement utilisable.

Automatisation. Comme souvent les tâches nécessitent d'être répétées, la programmation en Mel est conçue pour automatiser entièrement les tâches répétitives. En effet, la programmation permet de généraliser les procédures : différentes tâches dépendantes du même contexte peuvent être exécutées à partir du même script.

Extension. Maya permet de rajouter des fonctionnalités et des outils spécifiques. Ces fonctionnalités peuvent également être faites pour travailler de façon transparente avec le reste de Maya. Les outils développés par l'utilisateur apparaissent similaires aux outils standard de Maya. Les extensions sont créées en Mel et C++.

4.5. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté les préoccupations essentielles pour la formulation d'une démarche méthodologique complète de création, manipulation et gestion d'une maquette spatio-temporelle. Dans les deux chapitres suivants, nous présentons l'outil de reconstruction 3D des états historiques et l'outil de visualisation des transformations. En ce qui concerne l'outil de reconstruction 3D, pour chaque phase de la démarche, nous présentons les aspects méthodologiques et les solutions techniques identifiées. Le processus de reconstruction 3D, de structuration et de qualification de la maquette est plutôt complexe.

Afin de décrire aisément l'approche et la détailler sans perdre de vue l'objectif de chaque étape, nous structurons les thématiques abordées autour d'un cas d'application qui est bien adapté à la description spatio-temporelle et dont les sources documentaires sont plutôt variées. Ce terrain d'expérimentation est identifié avec le site du Trophée des Alpes à la Turbie. Depuis sa constitution, ce site a subi de nombreuses modifications : sa construction s'achève en -7, -6 av. J.-C. par Octave Auguste à l'occasion de la création de la province des Alpes-Maritimes, toutefois au début du Ve siècle il subit de nombreuses destructions et pillages, il est transformé en forteresse entre 1125 et 1325 et par la suite laissé à l'abandon pendant 8 siècles. Ce n'est qu'en 1905 qu'une campagne de fouilles est lancée. Les travaux de dégagement commencent en 1907 sous la direction de Jean Camille Formigé, architecte en chef des Monuments Historiques. Ce qui compte pour les maîtres d'œuvre, c'est la restitution du Trophée romain et les abords du monument sont malheureusement déblayés sans que soit fait de différence entre les vestiges de la forteresse et ceux du Trophée.

5. 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).

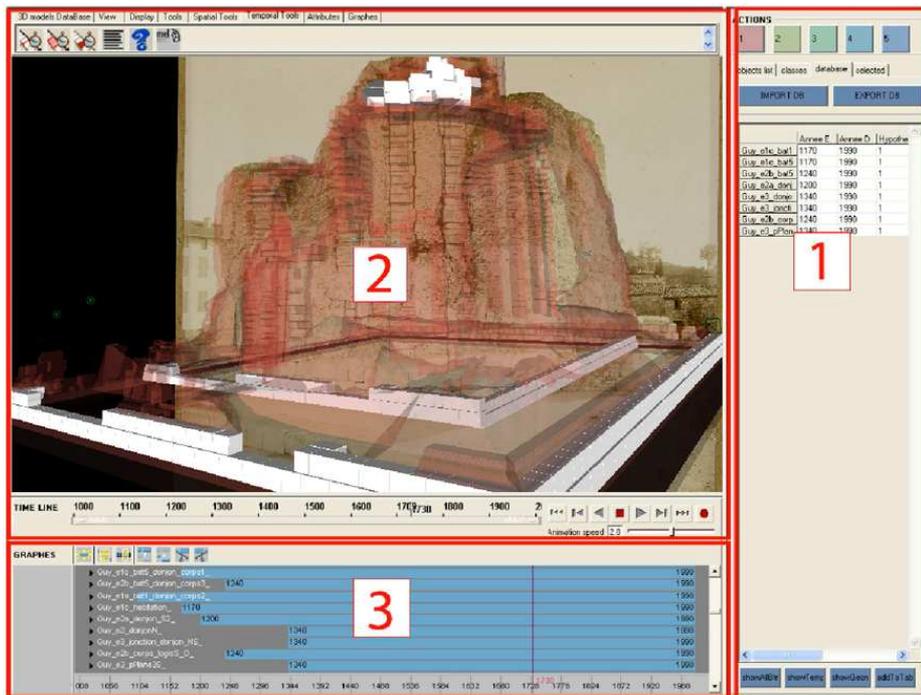


Figure 32. Environnement de travail qui permet : 1) la gestion des transformations pour chaque entité ; 2) modélisation à partir d'images et manipulation de la maquette à travers une barre temporelle ; 3) visualisation du cycle de vie des entités par le biais de diagrammes d'états.

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.

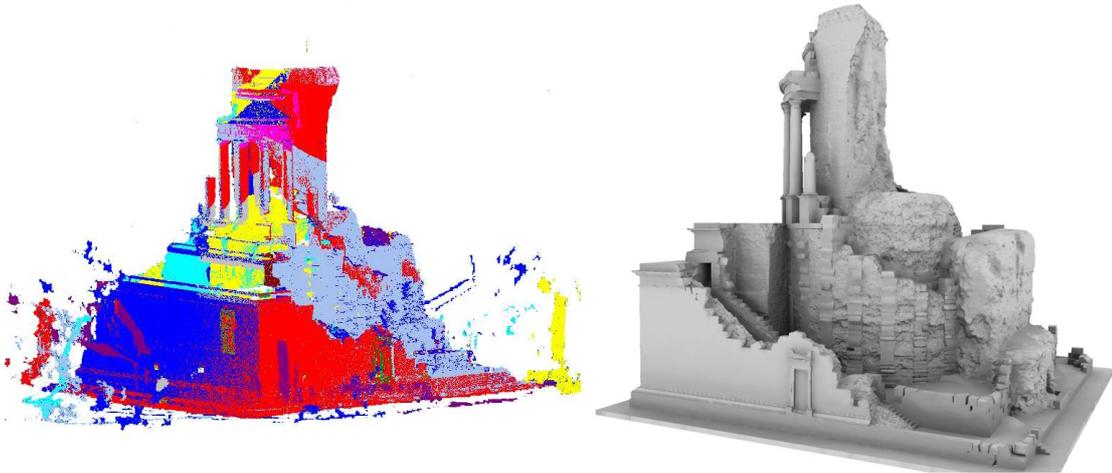


Figure 33. Etat actuel de Trophée des Alpes : à gauche, nuage de points du site ; à droite, modèle 3D élaboré à partir d'une approche hybride basée sur l'acquisition laser et des techniques de photogrammétrie.

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.

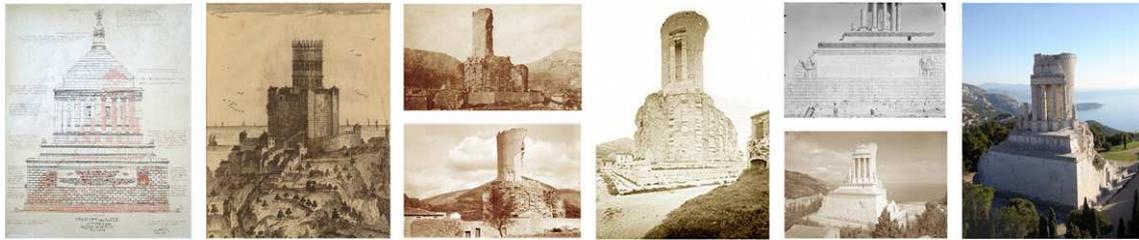


Figure 34. Sources documentaires iconographiques concernant le Trophée des Alpes et relatives à différentes époques. De gauche à droite : dessin hypothétique du monument dans sa forme originelle ; transformation du monument en forteresse au cours du Ve siècle ; vestiges du monument au début du XXe siècle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

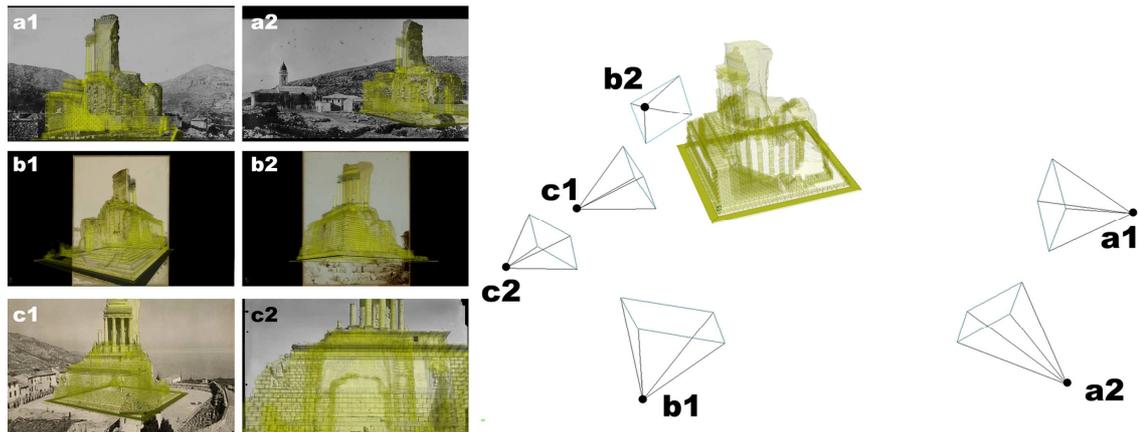


Figure 35. Référencement spatial des photos historiques du Trophée des Alpes sur le modèle 3D de l'état actuel de l'édifice.

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.

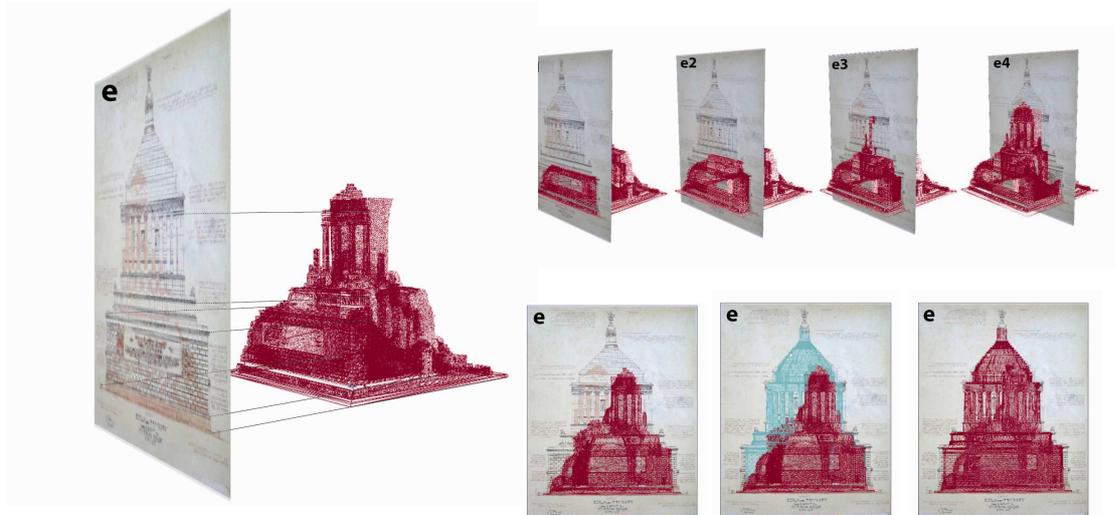


Figure 36. Insertion d'images en projection orthogonale dans la scène 3D.

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 :

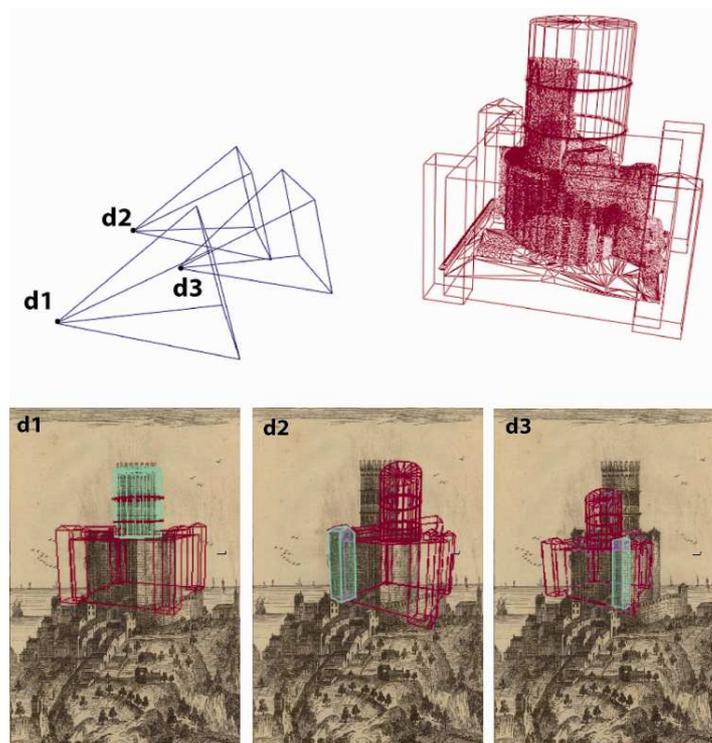


Figure 37. Référencement spatial de pseudo perspectives en fonction de divers objets de la scène représentée.

- 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.

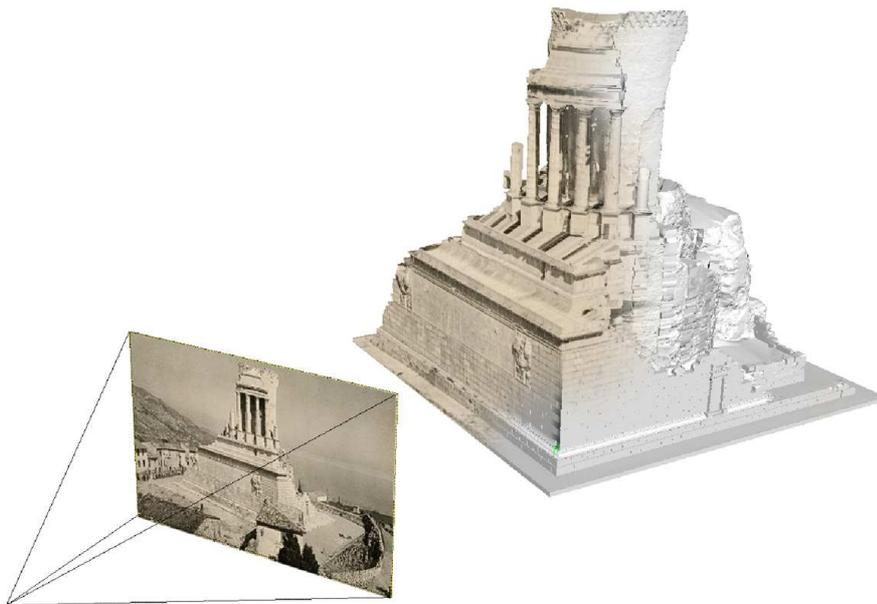


Figure 38. Application de textures à partir d'une photo historique du Trophée des Alpes.

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.

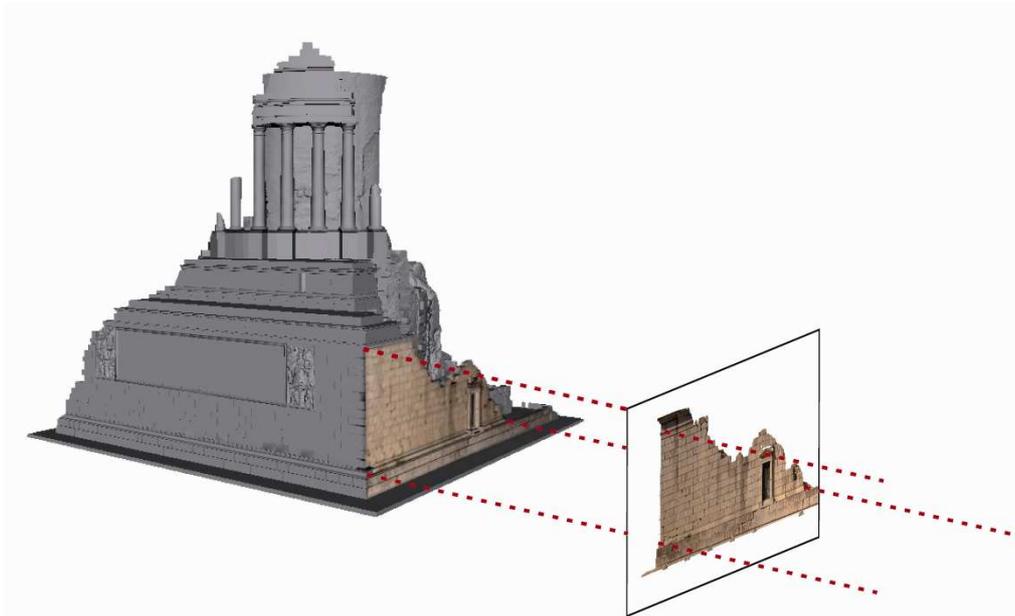


Figure 39. Application de textures à partir d'une photo redressée du Trophée des Alpes.

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.

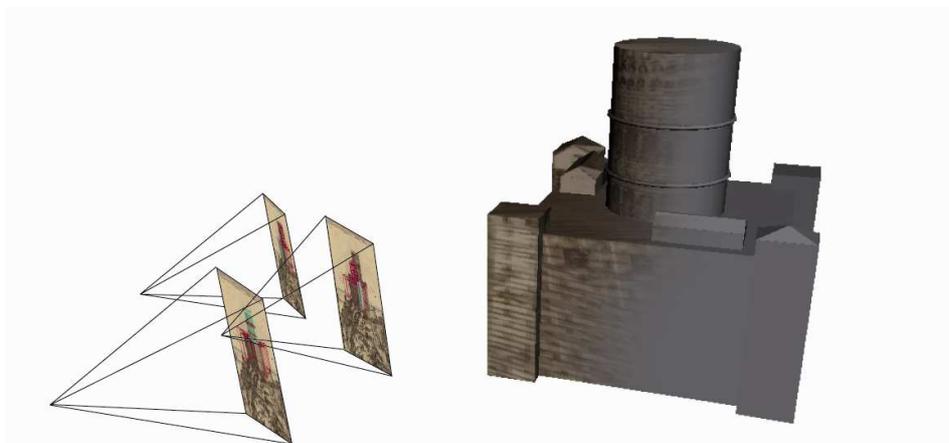


Figure 40. Application de textures à partir d'un dessin en pseudo perspective de la forteresse (ancien Trophée des Alpes).

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.

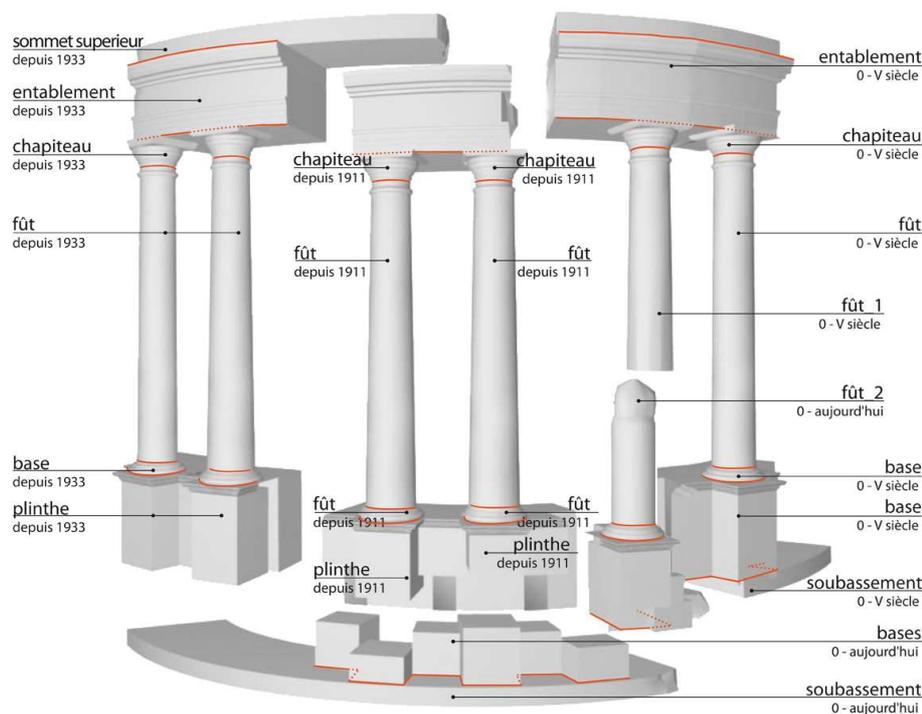


Figure 42. Découpage morphologique de la colonnade du Trophée des Alpes en fonction de la nature de l'analyse.

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 originaire 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.

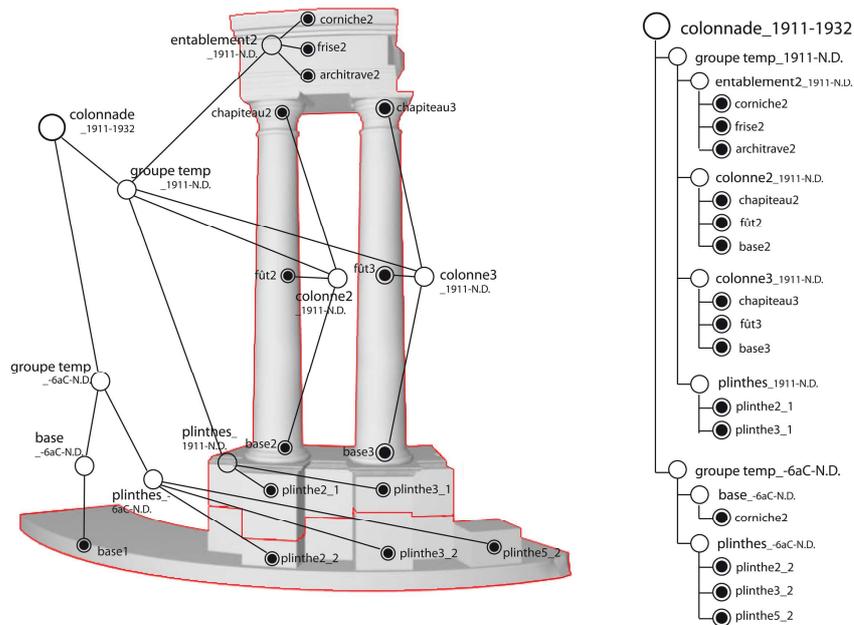


Figure 43. Associations des graphes à une certaine époque temporelle en fonction de la structuration hiérarchique choisie.

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.

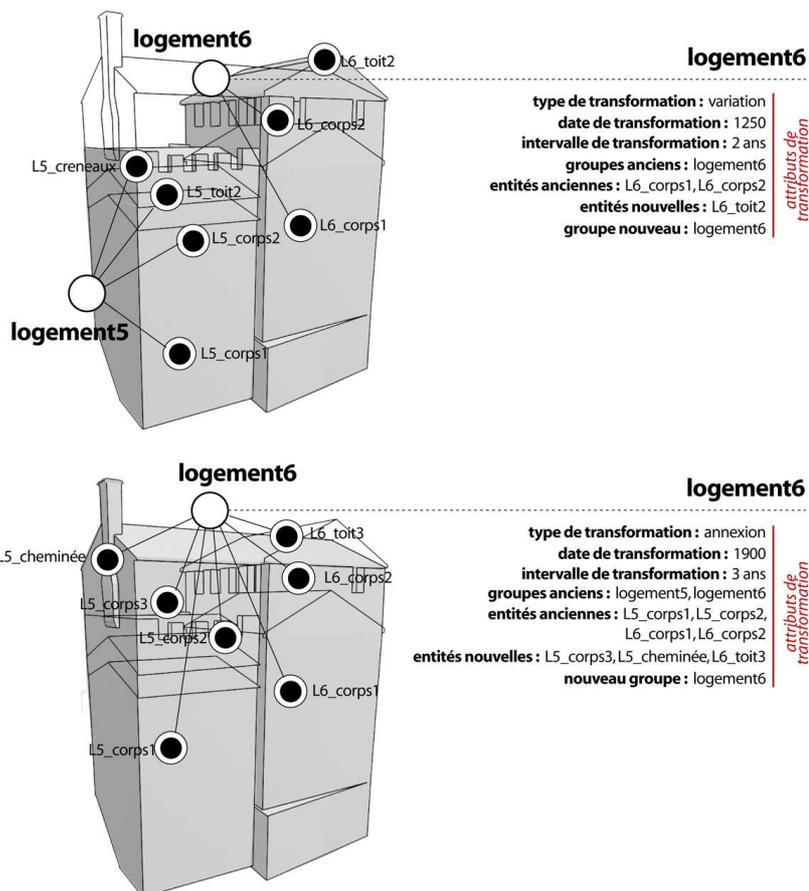


Figure 47. Qualification des transformations à travers les groupes. Les groupes deviennent les noyaux autour desquels l'historique d'un édifice est sauvegardé.

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.

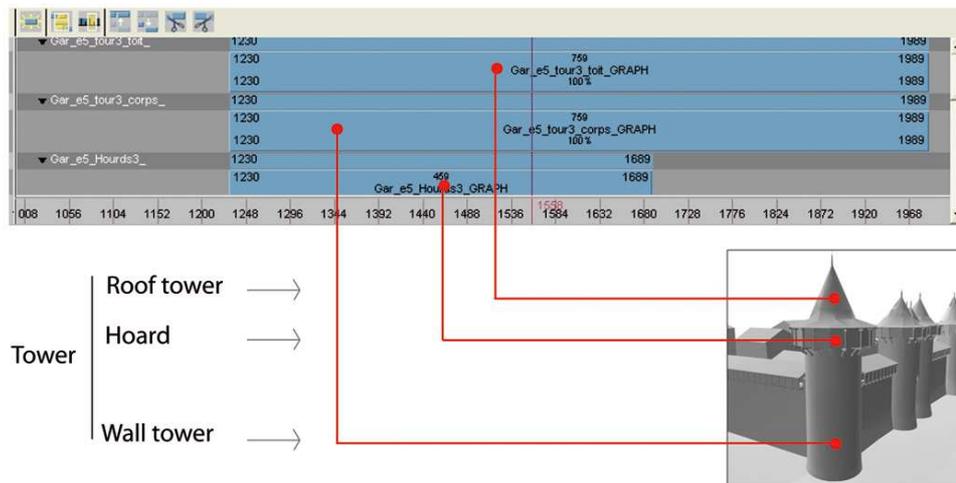


Figure 48. Visualisation des diagrammes d'états des hourdes de la Tour St. Paul du Château Comtal de Carcassonne. Chaque diagramme d'état affiche le nom de l'élément géométrique, la date de construction et de démolition et la durée de vie.

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.

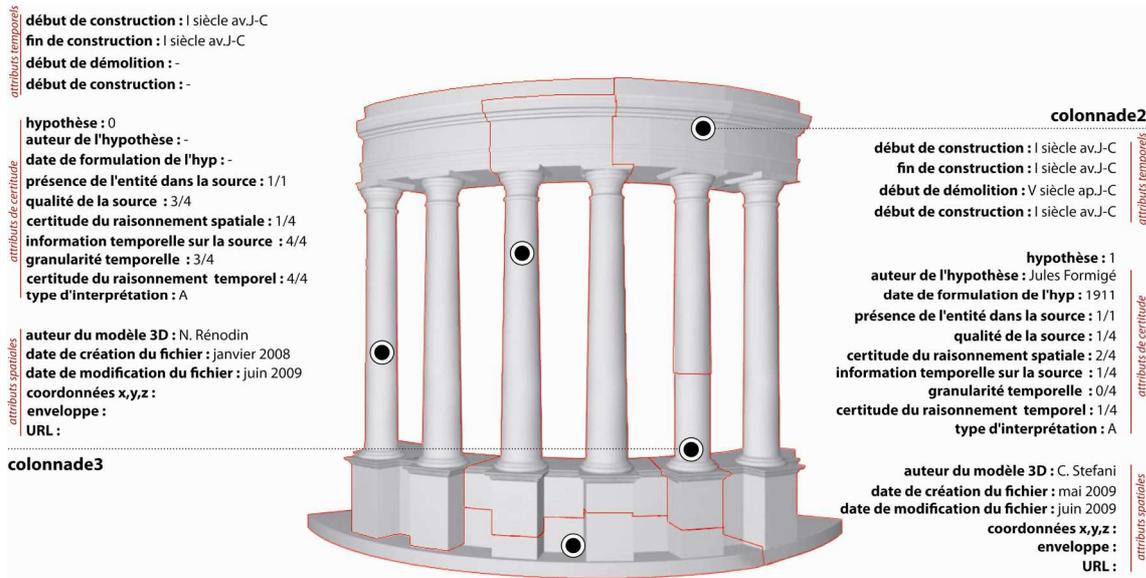


Figure 49. Qualification des entités par des attributs temporels, spatiaux et de certitude.

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.

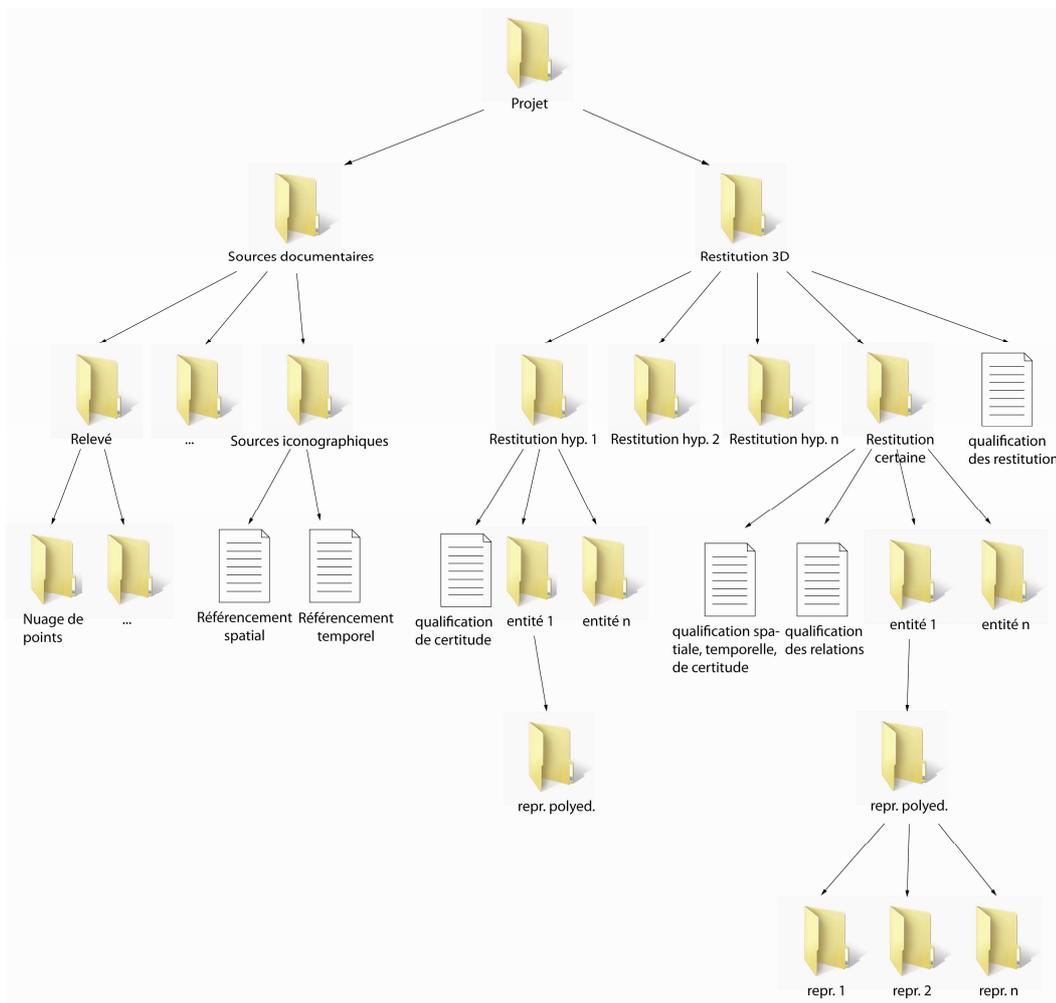
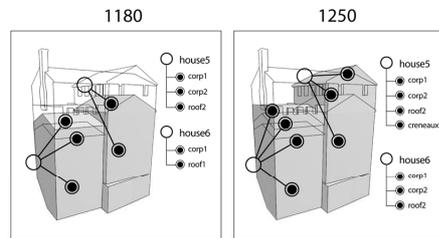


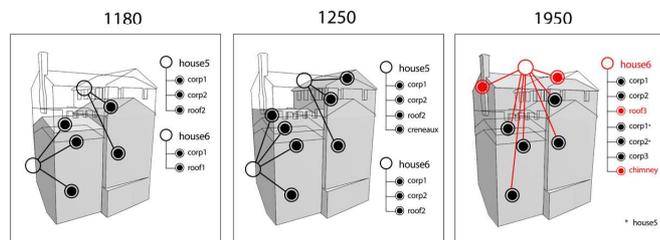
Figure 50. Gestion des projets : la structure des dossiers.

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.

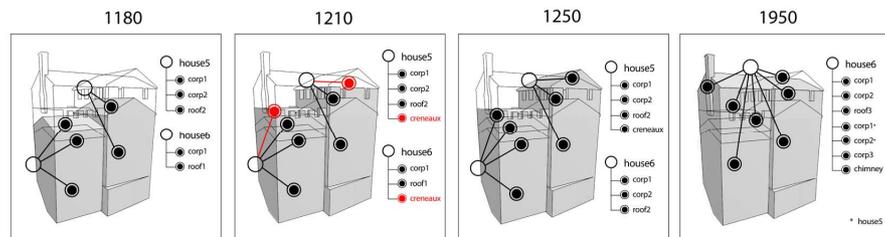
a. (A) — (B)



b. (A) — (B) — (C)



c. (A) — (A') — (B) — (C)



d. (Z) — (A) — (A') — (B) — (C)

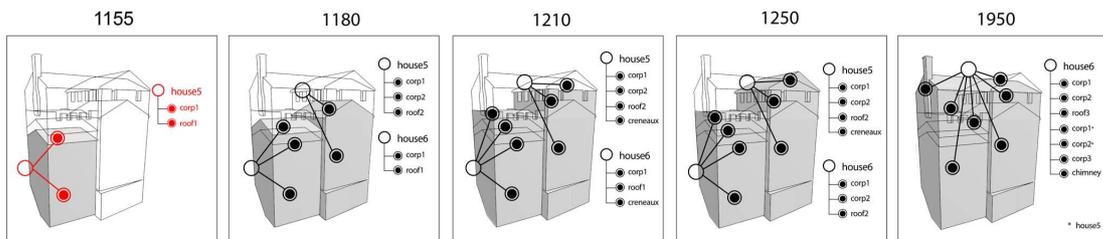


Figure 51. Insertion des nouvelles entités (en rouge) suite à la nouvelle découverte d'une étape temporelle.

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/>

6. Approche de visualisation et de consultation des évolutions et outil associé

Ces 30 dernières années l'évolution des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) a révolutionné la structuration des Systèmes d'Information. Des supports de visualisation¹⁵ efficaces ne se limitent pas à exploiter des données génériques ou statistiques mais permettent un accès plus rapide aux informations en favorisant la compréhension des données, leur comparaison et l'extraction d'informations pertinentes à travers des requêtes dynamiques (S. K. Card et al. 1999). De façon générale, l'exploration des données suit un processus en trois étapes qui comprend la vision d'ensemble du sujet, le zoom et filtrage des données, et enfin l'analyse de détails à la demande (D.A. Keim 2001). Tout particulièrement en patrimoine historique, une collecte variée d'informations permet de décrire le bâtiment et de reconstituer ses évolutions morphologiques et historico-sociétales : son état actuel est constitué par les informations acquises sur le terrain, et ses états passés sont décrits par les sources documentaires. De telles données sont le support sur lesquels toutes analyses et interprétations sont effectuées. La visualisation d'informations reliées à la maquette spatio-temporelle cherche à *donner accès* et à explorer rapidement les informations pertinentes ; à mettre en évidence les *relations*, les analogies et différences entre les données ; enfin, à *sélectionner et classer* les informations de manière interactive. Toutefois, actuellement peu de systèmes visent à fournir des outils d'interprétation des données issues des sources documentaires dans une plateforme unique et intégrée. De plus, un nombre encore plus limité de systèmes intègre des dispositifs de visualisation de l'évolutivité à la morphologie des édifices. Dans le but d'atteindre cet objectif, trois axes doivent interagir entre eux :

- La *structuration des données*. La définition d'un modèle sémantique pertinent permet de relier les données spatiales et temporelles très variées afin de

¹⁵ (Hascoët & Beaudouin-Lafon 2001) affirment que « le but de la visualisation d'informations est d'exploiter les caractéristiques du système visuel humain pour faciliter la manipulation et l'interprétation des données informatiques variées ». (D.A. Keim 2001) rajoute que « la représentation visuelle des données réduit l'effort cognitif nécessaire pour accomplir certaines tâches ». Les choix graphiques actuellement sur le marché répondent aux mécanismes humains de prise de conscience des informations visuelles : en effet l'homme d'abord a une perception globale d'une circonstance (*gestalt perception*), et seulement dans un deuxième temps il prend en compte les détails (Myers, D.G. 2000).

pouvoir décrire de manière cohérente le jeu d'informations. Telles données concernent la forme, la position, la datation et l'apparence visuelle de l'artefact.

- *Les représentations spatiales.* En fonction de la résolution géométrique et de la fiabilité de la restitution sur la base des sources, les représentations géométriques peuvent devenir des outils pour répondre à un certain questionnement et pour interpréter les données grâce à l'abstraction.
- *Le système de notation temporel.* Le système de graphes historiques permet de visualiser les évolutions en deux dimensions. Il constitue le cœur de la démarche qui permet de relier les informations géométriques du bâti aux époques temporelles en fonction des sources. A l'aide de cet outil, il est possible d'observer la dynamique des évolutions, de tracer les étapes et de formuler des requêtes transversales afin de descendre dans le détail de l'analyse.

Dans ce chapitre, trois aspects seront abordés. Premièrement, est présenté un état de l'art des systèmes décrivant les évolutions temporelles afin de retenir les caractéristiques essentielles pour une visualisation adaptée ; deuxièmement, sont décrits les principes d'une plateforme intégrée permettant la recherche et l'analyse spatiale et temporelle des données (Annexe E), en s'appuyant sur des représentations multiples. Enfin, est exposé le dispositif de visualisation des transformations historiques d'édifices à partir de la scène 3D et de graphes bidimensionnels. Afin de décrire le scénario d'utilisation du système, le terrain d'expérimentation de Château Comtal de Carcassonne est pris comme exemple. En effet, en raison de la richesse évolutive de ce site, cet outil se révèle particulièrement adapté à la compréhension des changements, à la description et à la comparaison des époques.

6.1. Etat de l'art des systèmes de visualisation d'informations temporelles

De manière générale, les évolutions au fil du temps peuvent être affichées de façon explicite ou implicite selon la technique de visualisation utilisée. Diverses classifications des systèmes de visualisation existent, en fonction du point de vue choisi pour l'analyse. Hascoët et Beaudouin-Lafon classifient les systèmes en 4 catégories qui regroupent les données selon le type de représentation : orientée points, orientée lignes, orientée surfaces, et remplissage de surfaces (Hascoët & Beaudouin-Lafon 2001). Shneiderman et Kleim (Shneiderman, B. 1996) (D.A. Keim & Ward 2002) classifient les systèmes en fonction du nombre de variables : les structures sont donc unidimensionnelles, bidimensionnelles, multidimensionnelles¹⁶, hiérarchiques et sous forme de graphes. De plus, certaines techniques sont plus adaptées pour visualiser des données spécifiques ; d'autres techniques plus génériques se prêtent à visualiser des données plus variées (Aigner et al. 2007; Frank 1998; D.A. Keim 2001). Une comparaison détaillée des caractéristiques de chaque système est disponible en Annexe F. Nous proposons un état de l'art qui classifie les structures de visualisation

¹⁶ On s'appuie sur la définition de (Wong & Bergeron 1997) qui considèrent les *données à paramètres multiples* comme l'ensemble de données multidimensionnelles et a variables multiples. De ce fait, les *données multidimensionnelles* se réfèrent aux dimensions des variables indépendantes ; en revanche le concept de *variables multiples* concerne la dimensionnalité des variables dépendantes d'un certain groupe de données.

par rapport à la dimension de la *représentation* et non par rapport à la dimension *des variables* du système. Cela signifie qu'un système en deux variables ne correspond pas forcément à une représentation 2D. Nous distinguons les systèmes suivants.

6.1.1. Systèmes linéaires de représentation

Ces systèmes sont généralement des *structures unidimensionnelles*, c'est-à-dire des compositions de données ayant une seule variable. Toutefois dans certains cas, des graphes¹⁷ peuvent être couplés avec une représentation linéaire du temps (Aigner et al. 2005; Reinders et al. 2001). A cette catégorie appartiennent par exemple les données temporelles, les données de type liste alphabétique¹⁸, des listes de documents, les résultats d'une recherche, l'historique des données supprimées ou les événements discrets. Les représentations sont très variées et elles comprennent les frises chronologiques, les approches basées sur des flux de données ou sur des symboles, les diagrammes en arc, le mur en perspective (*lifestream*). Les frises chronologiques désignent toutes représentations des événements selon une disposition parallèle à un axe temporel. Les barres temporelles sont utilisées dans des domaines variés tels que la conception des systèmes, le traitement du son et le montage vidéo, en histoire et archéologie, dans le domaine médical ou dans le cas de traitement de données personnelles (Plaisant et al. 1996). Ces systèmes¹⁹ ont l'avantage de gérer diverses granularités temporelles, selon les besoins du domaine (Viégas et al. 2007). Par exemple dans le projet Simile²⁰, à l'intérieur de bandes temporelles synchronisées (le déplacement de la barre principale conditionne le déplacement de la barre secondaire), les événements sont visualisés par des diagrammes ou des cercles selon leur durée. Parmi les outils numériques, les éditeurs audio/vidéo ont des interfaces très appropriées au défilement temporel. En effet, elles permettent de chevaucher les traces sonores, supprimer des bruits, isoler, couper, accélérer ou ralentir les traces. La barre temporelle est adaptée à l'affichage de l'ensemble des données sonores ou seulement une portion, la granularité étant multiple. Les boutons classiques du magnétoscope permettent d'écouter les traces sonores, de les avancer ou d'arrêter la progression. L'interface est mixte : la barre temporelle affiche la position temporelle relative dans le montage et permet d'analyser, manipuler et modifier le montage qui est vérifié en temps réel dans une fenêtre adjacente.



Figure 52. Interface d'un éditeur vidéo.

¹⁷ Les *diagrammes de Gantt* créés par Degrafa (www.degrafa.org). Le projet open source développé par l'institut MIT propose un cadre graphique déclarative pour Flex et AIR.

¹⁸ A cette sous-catégorie appartiennent des nombreuses techniques telles que les listes alphabétiques, les TileBars (Hearst 1995), les Value Bars, la technique SeeSoft (Eick et al. 1994), Document lens (Robertson & Jock D. Mackinlay 1993), le mur fuyant (Jock D. Mackinlay et al. 1991) Lifestreams (Freeman & Gelernter 1996), ou encore les diagrammes en arc (Martin Wattenberg 2002).

¹⁹ Pour une liste exhaustive d'applications, consulter <http://www.visualcomplexity.com/vc/> ou <http://www.many-eyes.com>

²⁰ Développé au M.I.T., Simile est aujourd'hui un logiciel open source qui peut être incorporé à d'autres logiciels ou sites internet (Zotero de Firefox, Google Maps, MediaWiki ou Google Spreadsheet) <http://www.simile-widgets.org/timeline/> et <http://en.wikipedia.org/wiki/SIMILE>

6.1.2. Systèmes bidimensionnels de représentation

Ces systèmes sont définis généralement par des axes cartésiens. Par conséquent ces données sont visualisées à travers deux composantes qui varient selon le domaine d'appartenance : dans le cas de données géographiques, les deux variables sont constituées par la longitude et la latitude, dans le cas de photographies, les paramètres sont la longueur et la largeur, enfin pour les diagrammes il s'agit de deux variables rattachées aux deux axes. Diverses techniques s'appuient sur une visualisation bidimensionnelle : *cartes, atlas géographiques et géopolitiques, graphiques et diagrammes*. Les graphiques et les diagrammes permettent de simplifier les concepts, de décrire les phénomènes et de mettre en évidence certaines corrélations. Différents types de diagrammes existent²¹ (à ligne, en aire²², camembert ou secteur, à barre, en anneaux, cycliques²³, radiaux²⁴, etc.). De plus, les représentations bidimensionnelles permettent de simplifier la visualisation des données multidimensionnelles²⁵. Dans le cas de cartes, d'atlas géographiques et géopolitiques, la représentation de l'espace géographique met en valeur les formes du territoire, les phénomènes géographiques, leur localisation relative par rapport aux espaces voisins, des études variées sur le territoire, la population, l'histoire ou d'autres genres d'évolutions. Ces systèmes exploitent deux techniques afin de visualiser les évolutions : l'interactivité et les animations. Les cartes dynamiques interactives permettent de comparer des données spatiales, d'effectuer des études statistiques, d'effectuer des sélections interactives des données tout en gardant une vision globale du sujet. Dans ce cas, les évolutions sont visualisées grâce à des cartes représentant les différents instants temporels (Eckert & Jégou 2004). La technique des animations consiste à afficher une séquence d'images 2D ou 3D dans le but de créer une illusion de mouvement²⁶. Cette technique est couramment utilisée en cartographie (Kaddouri 2008) : l'espace géographique étant animé par des évolutions, les animations sont devenues les moyens pour faire comprendre les évolutions d'un site et consulter plusieurs niveaux d'informations. Toutefois, même si pour certaines applications les animations se révèlent un outil efficace de communication de sujets complexes (Astrachan & Rodger 1998), le résultat est une illusion de mouvement ou d'un changement d'état. En effet, l'application d'animations au domaine des SIG a une grande limite : les animations, par leur nature chronologiques, ne permettent pas d'afficher les discontinuités et faussent donc la compréhension des évolutions d'un site.

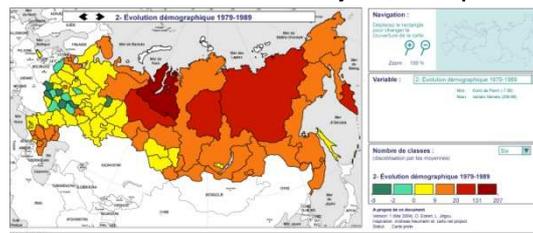


Figure 53. Evolution démographique en Russie. La sélection de différents items est faite par une carte dynamique SVG (Eckert & Jégou 2004).

²¹ <http://www.degrafa.org/>

²² Une variante intéressante des diagrammes en aire s'appelle *ThemeRiver*. (Havre et al. 2002) et utilise la métaphore de la rivière pour afficher les variations au fil du temps.

²³ *Cercle-Segments* (D. A. Keim 2000), *Visualisation sur un arc* (<http://www.textarc.org>), *Visualisation à spirale* (M. Weber et al. 2001) et *Time Tube* (Chi et al. 1998).

²⁴ *PolarEyes* (Jayaraman & North 2002), *TimeWheel* (Christian Tominski et al. 2004).

²⁵ Il s'agit de matrices comme *Tree map* de (Fekete & Plaisant 2002) ou *hyperSlices* (J. J. van Wijk & Liere 1993), mais aussi de représentations bidimensionnelles comme *Table lens* (Mihalisin et al. 1991), les *clusters et calendriers* (J. J. Van Wijk & Selow 1999) ou de vecteurs bidimensionnels comme *les flux animés* de (Jarke J. van Wijk 2002).

²⁶ Pour un état de l'art plus approfondi on renvoie à (Beck 2004).

6.1.3. Systèmes tridimensionnels de représentation

Ces systèmes permettent la visualisation des données tridimensionnelles à travers des axes cartésiens XYZ. On liste par la suite diverses méthodes de visualisation en trois dimensions. L'espace 3D permet la manipulation de vues axonométriques et en perspective qui favorisent la compréhension des données affichées en tant que volumes. L'affichage peut concerner des données très différentes : Keller visualise des données statistiques (P. R. Keller & M. M. Keller 1994) ; Matthews représente le comportement temporel d'un nuage de points (Matthews & Roze 1997) ; Moere simule le comportement du marché financier à court et long terme (Moere 2004). D'autres systèmes encore permettent de visualiser des données hiérarchiques à variables multiples²⁷ ou de combiner des variables continues et discrètes, comme *SpiraClock* (Dragicevic & Huot 2002), *Lexis Pencils* (Francis & Pritchard pas de date) ou la *visualisation par spirales sur cartes* (C. Tominski et al. 2005). Enfin les systèmes de visualisation de données géographiques assemblent des données géo spatiales avec d'autres outils de visualisation pour analyser objets, activités humaines, ou trajectoires (Kapler & Wright 2005).

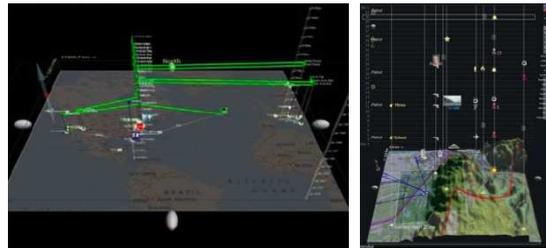


Figure 54. Projet GeoTime. Les trajets verts représentent les mouvements d'une entité exprimés par rapport aux coordonnées géographiques et temporelles (Kapler & Wright 2005).

6.1.4. Systèmes hybrides de représentation

Les systèmes hybrides sont très adaptés pour représenter les données multidimensionnelles. Bien que certains soient très sophistiqués, aucun n'est parfait. Les techniques appliquées aux données ayant plus de 3 dimensions sont nombreuses : de façon générale, s'il s'agit de données hiérarchiques, le nombre de variables est réduit afin de les représenter dans des systèmes linéaires ; en revanche, si la visualisation est basée sur des axes multiples, deux possibilités sont envisageables : d'une part la représentation peut être reconduite à une visualisation bidimensionnelle (systèmes radiales), d'autre part différentes représentations des données peuvent coexister simultanément (systèmes hybrides). Nous nous concentrons sur cette dernière typologie. Ces applications sont utilisées dans des domaines très variés. En conception automobile l'exploration de quantités importantes de données nécessite un degré élevé d'interactivité et s'appuie sur l'utilisation de diagrammes 3D combinés

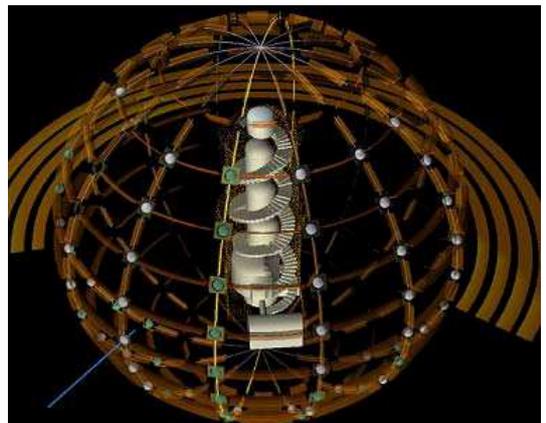


Figure 55. Dispositif Infosphere pour le tri et la visualisation d'informations spatiales, temporelles et documentaires.

²⁷ *disques d'arbres en 3D* (Tekusova & Schreck 2008), *arbres coniques en 3 dimensions* (S. K. Card et al. 1999) ou *arbres hyperboliques* (Lamping et al. 1995) et *graphes* (Saraiya et al. 2005).

avec des affichages en 2D (Doleisch et al. 2004); d'autres approches encore permettent d'explorer des espaces à n dimensions contenant un nombre arbitraire de variables, comme *Worlds-within-worlds* (Feiner & Beshers 1990); en revanche, en patrimoine historique la géométrie 3D peut être combinée avec d'autres variables (le temps et les sources documentaires). A titre d'exemple, certaines applications (Ji-Hyun et al. 2005; Zuk et al. 2005) intègrent à la géométrie 3D des diagrammes temporels (représentant l'état d'existence de la géométrie). Une autre application (J.Y. Blaise et al. 2008) vise à trier et visualiser les informations spatiales, temporelles et documentaires sur le site historique du Pharo de Marseille. Ce système combine un modèle 3D de l'artefact avec une métaphore géo-visuelle (les parallèles et les méridiens d'un globe). Les parallèles, les méridiens et le diamètre du globe correspondent aux critères de tri : la morphologie de l'artefact, les documents et le temps.

6.1.5. Analyse critique des systèmes

Dans ce paragraphe ont été présentées des techniques de visualisation de données classifiées selon leur dimension de représentation. Tels systèmes ont mis en évidence divers aspects concernant le traitement de la notion temporelle qui sont décrits par Aigner (Aigner et al. 2007). En fonction de la méthode utilisée, nous distinguons les avantages et les limites concernant trois aspects fondamentaux : le temps, les données et la représentation. Telle analyse des systèmes fait l'objet d'un tableau (Annexe F) qui détaille ces trois critères.

Dimension de la représentation. Le type de représentation est fortement conditionné par le nombre de variables. De façon générale, une représentation linéaire est adoptée pour les systèmes à une variable ou pour les systèmes hiérarchiques. Les systèmes bi ou tridimensionnels sont utilisés dans deux cas : s'il s'agit de représenter deux ou plusieurs variables, ou si la variable est un vecteur (le vecteur étant par sa nature un porteur d'informations multiples). De façon générale, en cartographie deux dimensions suffisent pour la représentation, toutefois dans le domaine du patrimoine historique, les systèmes 3D ou hybrides permettent d'encoder des informations supplémentaires qui autrement seraient perdues.

Niveau d'abstraction des données. L'analyse et le traitement de certaines données ne peuvent pas se limiter à leur simple affichage graphique. Si les données statistiques par leur typologie, se prêtent à être représentées de façon abstraite, en revanche, les données temporelles requièrent des efforts majeurs d'abstraction. Afin de représenter telles données avec un niveau d'abstraction efficace (qui prenne en compte la notion d'événement), il est nécessaire d'intégrer des méthodes visuelles et analytiques.

Structure temporelle. Parmi les systèmes analysés, la *visualisation linéaire* sous forme de la barre temporelle est très adaptée à la représentation des évolutions, qui peuvent être modélisées comme éléments discrets (*GeoTime*) ou continus (*éditeurs de son et vidéo*). Pour pouvoir montrer les continuités et discontinuités, les éditeurs vidéo/audio sont plus intéressants, car ils gèrent différentes *granulométries temporelles*.

Ces trois aspects permettent une ultérieure réflexion sur la représentation des évolutions. En fonction du type de représentation, les évolutions sont décrites explicitement ou implicitement. Les *représentations statiques* permettent des bilans quantitatifs et les données peuvent être explorées à diverses échelles sans limites temporelles, mais peu de variables peuvent être représentées. En revanche, les *représentations dynamiques*²⁸ utilisent le temps pour décrire les changements. Leur limite réside dans le fait qu'il est difficile d'appréhender globalement et de retenir une à une de nombreuses variables qui n'apparaissent pas simultanément (Tversky & Morrison 2002).

6.2. Structuration d'informations temporelles

De manière générale, le rôle de la représentation tridimensionnelle est celui d'afficher les informations spatiales concernant la géométrie et l'apparence visuelle des objets. Toutefois, l'état de l'art effectué en visualisation d'informations a souligné un autre facteur : afin de visualiser non seulement la géométrie des édifices mais aussi leurs évolutions et relations mutuelles, une quatrième dimension doit être intégrée au Système d'Informations : la notion temporelle. L'analyse des applications actuelles pour l'interaction avec la scène 3D amène à définir le cadre de développement autour duquel se focalise notre Système pour la consultation des évolutions spatio-temporelles.

Le premier critère concerne le **système de représentation**. Quand il s'agit de représenter des informations temporelles, la restitution tridimensionnelle se révèle insuffisante pour décrire les changements au fil du temps. Afin de comprendre les évolutions des sites historiques, il semble fondamental d'identifier un système hybride qui couple les restitutions 3D des états passés à la visualisation linéaire abstraite des évolutions temporelles. Pour faire cela, nous avons privilégié la création d'un Système d'Informations intégré capable de mettre en relation les graphes descripteurs des évolutions historiques avec la morphologie de la maquette. Le Système relie les informations bidimensionnelles et tridimensionnelles autour d'un site Internet accessible à un public vaste et diversifié.

Le deuxième aspect concerne **la description des évolutions temporelles**. Les transformations temporelles devraient être décrites dans un système linéaire du temps capable de représenter les événements qui se sont déroulés en plusieurs années, décennies ou siècles. La notation de graphes historiques se révèle un système adéquat pour la représentation des changements et des relations temporelles.

Un troisième facteur mérite d'être pris en compte : **la représentation du niveau d'incertitude**. Un système d'Informations gérant les étapes historiques doit nécessairement ouvrir son panorama à la gestion des hypothèses et la comparaison des restitutions incertaines. Pour visualiser et comparer les données, diverses solutions visuelles abstraites doivent être prises en compte. *L'incertitude* étant un aspect conditionnant la qualité et l'analyse des données, on doit pouvoir accorder un niveau de confiance à la maquette afin de mettre en évidence les informations floues

²⁸ La *représentation statique* ne dépend pas du temps, c'est-à-dire elle ne change pas automatiquement au fil du temps. Les modifications sont seulement le résultat de l'interaction humaine. Au contraire, la *représentation dynamique* change dynamiquement au fil du temps et elle est donc une fonction du temps. (Müller & H. Schumann 2003).

ou incertaines. La qualification du niveau de connaissance sur la maquette est possible si le lien entre la maquette et les sources est sauvegardé.

Le système de consultation doit être accessible à divers profils d'utilisateurs : le grand public, les administrateurs et les experts (architectes, archéologues et historiens). Le niveau d'accessibilité est établi en fonction des exigences des utilisateurs (simple consultation des données ou insertion des collectes de données). L'outil présenté dans ce chapitre permet de décrire, visualiser et afficher les informations sur les édifices, leurs évolutions morphologiques et socio-économiques, et structure, autour d'un système de graphes, les représentations tridimensionnelles des états historiques d'un site. Comme l'analyse des sources métriques est un sujet très vaste, on observera seulement les données extraites à partir des sources documentaires historiques. De plus, on restreint l'analyse au seul niveau de fiabilité accordé à la maquette tridimensionnelle. D'une part le niveau de fiabilité accordé aux sources a déjà été traité dans (J.-Y. Blaise 2003) ; d'autre part la complexité de l'interprétation rend impossible toute classification univoque des sources.

Les fonctionnalités actuellement implémentées dans l'application concernent :

- l'accès et la manipulation dans l'espace des maquettes numériques spatio-temporelles ;
- la visualisation et comparaison d'états temporels, des transformations et des hypothèses à travers des codes visuels abstraits ;
- la visualisation et manipulation dynamique de l'historique des édifices à travers des graphes gérant différentes granularités spatiales et temporelles.

6.2.1. Architecture du système

L'application Nubes Tempus intègre à l'architecture de Nubes Visum un outil de visualisation des évolutions temporelles par le biais de graphes historiques. L'application est basée sur une architecture en trois parties (Figure 57) :

- Une *scène 3D interactive*, développée en Virtools DEV, permet d'afficher, de manipuler et de comparer les représentations tridimensionnelles.
- Des *graphes historiques*, développés en SVG, affichent les évolutions historiques selon différentes granularités spatiales et temporelles et dialoguent avec les entités affichées dans la scène 3D.
- Un *site Internet* en PHP constitue l'accès utilisateur aux données stockées dans la base et fournit les passerelles nécessaires pour le dialogue entre la scène 3D et la base de données.

Une *base de données* basée sur le modèle Entités-Relations-Temps, développée en MySQL, contient les attributs temporels, les attributs de qualification des hypothèses (permettant d'organiser des représentations multiples), les sources documentaires rattachées à chaque représentation et l'historique des transformations subies par les édifices.

6.2.2. Environnement de développement

L'application NUBES Tempus étant basée sur le dialogue entre une base relationnelle SQL étendue à la notion temporelle, une scène 3D et des graphes historiques, l'environnement de développement est composé par différents langages :

- **PHP** (www.php.net) est un langage interprété exécuté du côté serveur. La syntaxe du langage provient de celles du langage C, du Perl et de Java. Ses principales caractéristiques sont la gratuité du code source, la simplicité d'interfaçage avec de nombreux SGBD (Système de Gestion de Base de Données), la possibilité d'inclure le script PHP au sein d'une page HTML et enfin la possibilité de l'utiliser en conjonction avec le langage SVG.
- **MySQL** (www.mysql.com) est un SGBD gratuit disponible sur de nombreuses plateformes : Unix, Linux, Windows, MacOS X, Solaris, etc...). MySQL est un serveur de base de données relationnelles SQL multi-thread et multi utilisateurs.
- **SVG** (www.w3.org) est un format de données conçu pour décrire des ensembles de graphique vectoriel et basé sur XML. Ce format est spécifié par le World Wide Web Consortium. Les coordonnées, les dimensions et les structures des objets vectoriels sont indiquées sous forme numérique dans le document XML. Un système spécifique de style (CSS ou XSL) permet d'indiquer les couleurs et les polices de caractères à utiliser. Ce format gère les formes géométriques de base, les *paths* (qui utilisent les courbes de Bézier), le remplissage (qui peut se faire à l'aide de *gradients*, des *patterns* ou de *filters*), les *markers* (des motifs le long des chemins) et le *canal alpha* pour la transparence. Comme dans tout document XML, les objets sont organisés sous forme d'arbre. Le format SVG, accessible depuis JavaScript, permet l'intégration d'animations et la manipulation des objets graphiques grâce à des scripts, à des événements et par l'intermédiaire du modèle Document Object Model (DOM). SVG peut être visualisé nativement avec certains navigateurs web, ou avec un plug-in.
- **Virtools DEV** est une plateforme de développement d'applications pour la création et visualisation de contenus 3D interactifs. Il est constitué par un ensemble de technologies :

Interface graphique : une interface graphique intuitive supporte la programmation et permet de créer des interactions de l'espace 3D par composition de blocs.

Un moteur à comportement : Virtools offre la possibilité de manipuler une collection de blocs d'une bibliothèque et des blocs programmés. Les fonctions de la bibliothèque concernent les classes suivantes : caméra, caractères, collisions, contrôleurs, grilles, interface, lumières, opérateur logiques, matériaux, textures, modification de polyèdres, fonctions narratives, etc.

SDK (kit de développement logiciel) : Virtools Dev inclut un kit de développement logiciel (bibliothèques, DLL) qui permet d'accéder à certaines fonctionnalités de bas niveau.

VSL (Virtools Scripting Language) est un langage interprété qui complète l'interface graphique et le SDK. Il permet de créer des scripts de comportement avancé.

Un moteur de rendu : le moteur de rendu de Virtools permet des rendus en temps réel. Il supporte les standards OpenGL et DirectX, les *shaders* (filtres) et les pixels.

6.2.3. La scène 3D

Le contenu de la scène 3D est visualisé grâce à un visualisateur pour le web de Virtools gratuit et téléchargeable. La manipulation des représentations géométriques dans la scène 3D est possible grâce aux blocs conçus dans Virtools. Les représentations peuvent être sélectionnées indifféremment par la page PHP ou par les graphes historiques dynamiques dans l'interface SVG. Les comportements implémentés dans Virtools intègrent aux procédures développées dans Nubes Visum des outils spécifiques pour la visualisation des états historiques et leur comparaison en diverses couleurs, saturations et techniques de rendus.

6.2.4. L'interface des graphes historiques

Au dessus de la scène 3D, une interface SVG permet la lecture des transformations historiques des édifices au travers de graphes dynamiques générés côté serveur avec PHP sur MySQL. Les comportements implémentés intègrent trois aspects complémentaires. Premièrement, une barre dynamique temporelle permet de sélectionner à l'aide d'un curseur l'époque temporelle affichée dans la scène 3D, par le biais de scripts javascript de communication entre SVG et Virtools. Deuxièmement, la liste de graphes historiques, générés à la volée, est affichée en fonction du projet sélectionné. Les graphes sont en liaison avec les entités géométriques de la scène 3D : la sélection d'une portion de graphe permet l'affichage dans la vue 3D de la géométrie correspondante. Troisièmement, des outils de zoom permettent d'afficher les graphes à diverses résolutions spatiales et temporelles.

6.2.5. La base de données

La base de données utilise la structure du modèle Entité-Relation étendu à la notion temporelle ; ses tables sont structurées en trois catégories :

- la catégorie **Sémantisation** contient les entités constituées selon le découpage morphologique privilégié. Comme les entités existent seulement pour une période donnée, elles sont accompagnées par leurs attributs temporels, spatiaux et par un niveau de confiance désignant la maquette. Tous les entités sémantiques temporelles sont référencées comme hypothèses ou éléments certains, et sont qualifiées selon le niveau de certitude spatial et temporel.
- la partie **Historique des transformations** décrit les modifications subies par les entités géométriques. Ces tables mettent en relation réciproque les édifices, les composants et les transformations subies (union, division, etc..) à des moments précis. Tout particulièrement, pour chaque entité, les tables détaillent

le type de transformation subie, l'édifice et le groupe à laquelle l'entité appartient avant et après transformation, les dates (début et fin) de la transformation et l'événement qui l'a déterminé (si connu). A partir de ces tables, il est possible d'expliciter la liste d'entités et le moment (*time stamping*) correspondant à chaque transformation ; de plus, un changement étant ponctuel ou progressif, toute transformation est qualifiée par une durée. A titre d'exemple, il est possible d'enregistrer une démolition à cause d'un tremblement de terre (transformation ponctuelle avec durée instantanée) ou une dégradation à cause d'une inondation (transformation progressive sur un arc temporel de 30 ans).

- la partie **Représentation** relie l'ensemble des entités morphologiques de la scène (les diverses restitutions et les versions) avec les sources iconographiques de référence, les niveaux de certitude affectés à la restitution et les moyens interprétatifs (déduction, analogie ou mixte) adoptés pendant la reconstruction géométrique.
- la partie **Sources documentaires** contient la liste de sources, enrichies par la date (présumée ou certaine) de création de la source, l'auteur, la date de découverte de la source et un niveau de confiance attribué.

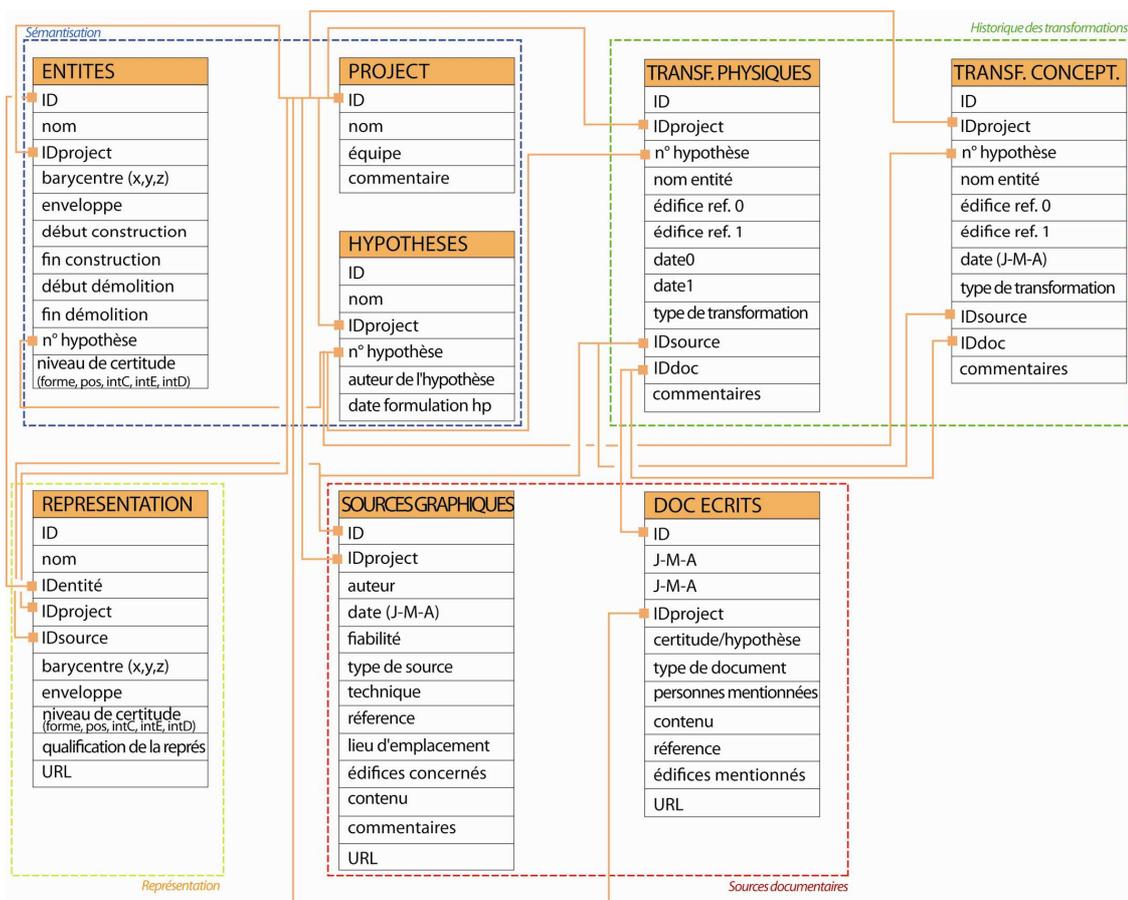


Figure 56. Exemple de quelques tables de la base de données Entités-Relations-Temps du système de consultation sur le web.

La base de données est développée autour de trois concepts. Premièrement, l'enregistrement des restitutions séparé de l'aspect sémantique permet de garder trace des diverses versions des objets. A titre d'exemple, un édifice restitué à partir d'un dessin aura une résolution inférieure au même édifice restitué à partir d'un relevé. La sémantique de l'édifice est la même mais l'approfondissement de détail est différent.

Deuxièmement, l'enregistrement des modifications architecturales dans l'*Historique des transformations* donne lieu à une sorte de *journal de transaction* qui garde la trace des changements. Afin d'obtenir des restitutions passées, il est possible de revenir en arrière en traçant le journal des transactions vers l'arrière. La trace des transformations correspond à la notion d'héritage (*créée à partir de, transformé en*) décrit par (Kavouras 2001). A la différence d'un tel système (où chaque entité garde un lien avec la version précédente et celle suivante), le système que nous avons développé contient des entités qui sont directement liées à la période désignée par la transformation. L'ordre temporel des événements est déduit à partir des dates attachées à chaque entité et à chaque transformation.

Troisièmement, la structuration du modèle en fonction de la sémantique spatio-temporelle permet de réduire la taille des entités géométriques. L'affichage de l'évolution d'une restitution est possible grâce à la sauvegarde des liens entre les diverses restitutions et versions d'objets. Cela permet d'éviter la redondance des données.

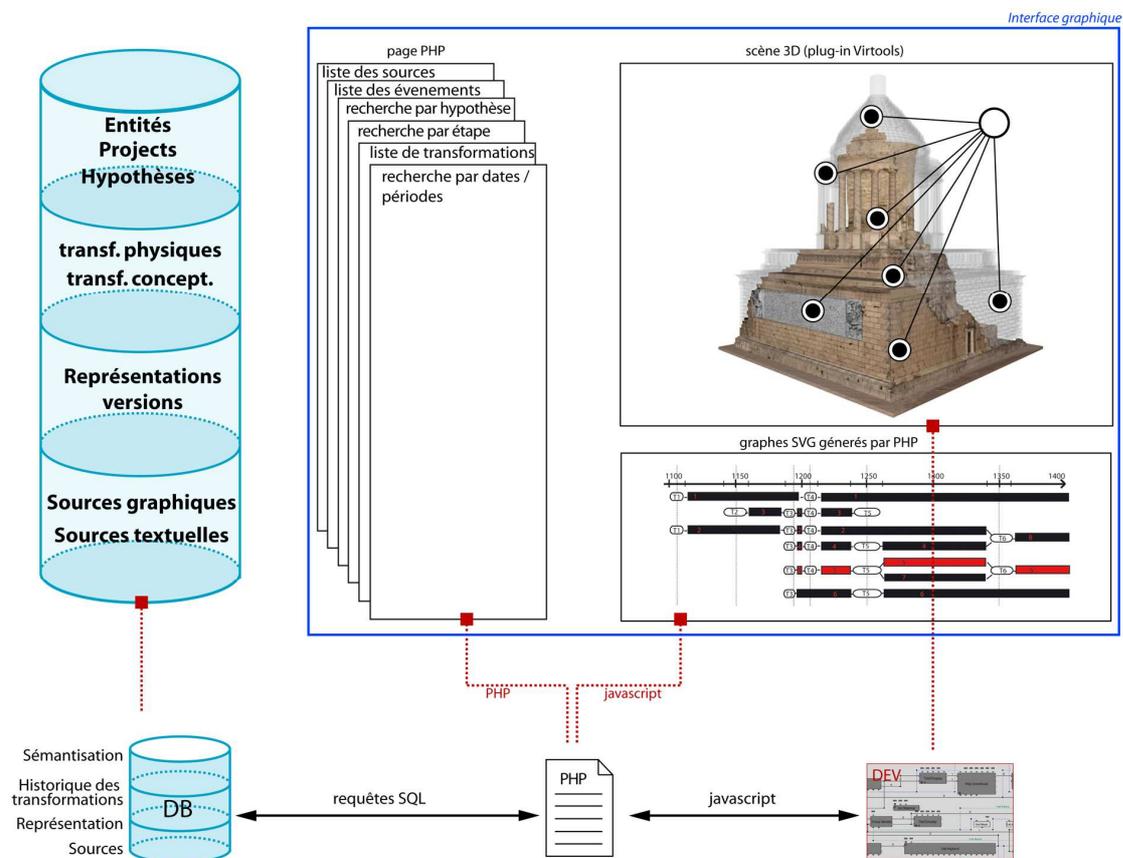


Figure 57. Architecture du système Nubes Tempus. Le site PHP, la scène 3D et l'interface en SVG pour la gestion des graphes dialoguent entre eux à travers des scripts java, PHP, SVG et les requêtes SQL.

6.2.6. Dialogue entre les parties du système

L'application web est basée sur le dialogue entre une base relationnelle SQL étendue à la gestion de la dimension temporelle, la scène 3D, et une interface de graphes dynamiques. Ces derniers sont générés à partir de la base de données, à travers des scripts PHP, SVG, java et ECMAScript²⁹ (Figure 57).

L'utilisateur a accès à une page PHP pour formuler une requête temporelle qui est envoyée au serveur MySQL. Les édifices obtenus sont visualisés à travers un plug-in Virtools sur la page web. Premièrement, un bloc DEV permet de formuler des requêtes spatiales et temporelles dans la base de données et de les afficher directement dans la scène 3D. Deuxièmement, des graphes historiques réalisés en SVG représentent les durées de vie et les transformations des bâtiments de la scène 3D. La sélection de la géométrie en fonction des étapes historiques peut être faite également à partir des graphes générés dynamiquement en SVG. Au passage de la souris sur les graphes certaines informations telles que le nom de l'édifice, la catégorie d'appartenance (hypothèse, certitude), les dates et la durée de vie sont affichées.

6.3. Outils de sélection et manipulation des transformations

Dans le domaine du patrimoine historique un système d'informations capable de formuler des requêtes temporelles ou de visualiser les états historiques ne suffit pas. En effet, les transformations sont variées et ne se limitent pas à la simple création ou démolition. Les diagrammes décrits dans le paragraphe 5.3.2.3 ont une limite fondamentale : ils affichent seulement l'état d'existence des entités morphologiques à travers la logique booléenne. Au contraire, les graphes devraient représenter l'historique et décrire tout type de changement, inclus l'annexion, la division, la reconstruction, le déplacement, la dégradation ou encore l'enterrement. Les avantages de ce genre de visualisation sont illustrés par la suite.

6.3.1. La formulation de requêtes temporelles

Le système NUBES Tempus a été conçu pour interroger des sites historiques riches en transformations d'édifices et incertitudes spatiales et temporelles. Il est donc prédisposé à afficher des informations variées sur des sites historiques pour leur morphologie et leur histoire. Une page PHP permet de sélectionner le site historique dont les entités géométriques seront prises en compte tout le long de l'analyse. A partir de cette même page, il est possible de sélectionner les restitutions hypothétiques ou certaines, ainsi que d'isoler les édifices en fonction de dates ou d'arcs temporels (existence, construction ou démolition).

L'utilisateur peut choisir des dates de sélection pertinentes au site, ou il peut insérer des dates aléatoires. Les requêtes temporelles exécutées par rapport aux dates ou aux périodes servent à connaître l'état d'existence d'un bâtiment avant, pendant ou après une date (un instant) ou une période (un intervalle). Une requête

²⁹ ECMAScript est un langage de programmation orienté objet de type script standardisé par Ecma International dans le cadre de la spécification ECMA-262. Les spécifications sont implémentées dans la plupart des langages script, comme JavaScript ou ActionScript.

PHP vérifie la correspondance des entités aux critères temporels et stocke la nouvelle liste dans un tableau qui constitue une passerelle entre les éléments de la base et les éléments affichés. Les critères de sélection prennent en compte les relations entre les événements ponctuels et les intervalles, ou bien entre deux intervalles (à ce propos, se reporter à la notion de topologie temporelle décrite en *Annexe C*). Le système permet de connaître les édifices répondant aux relations primaires (construction, démolition avant/pendant/après une date ou une période); toutefois d'autres relations sont possibles entre deux intervalles de temps. A titre d'exemple, le système pourrait être implémenté pour afficher la superposition partielle entre deux intervalles, cas récurrent dans l'interrogation des bases de données en patrimoine historique.

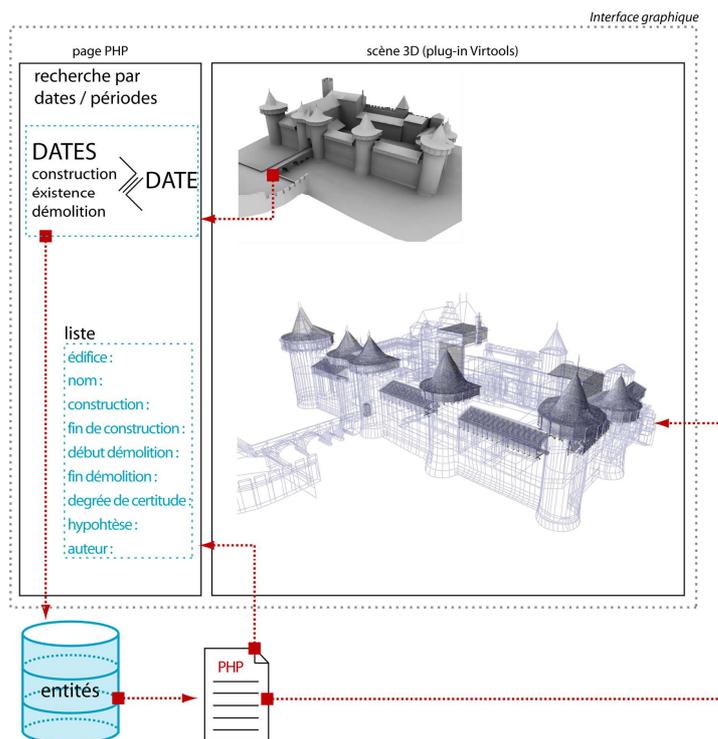


Figure 58. Schéma de fonctionnement de l'outil de formulation de requêtes temporelles.

6.3.2. Visualisation des états historiques

Au-delà des requêtes initiales à partir de la page PHP, les états temporels peuvent intuitivement être sélectionnés à partir de la barre graphique de la fenêtre inférieure, qui affiche, pour chaque projet sélectionné, l'arc temporel pendant lequel les états historiques se sont déroulés. L'utilisateur est amené à déplacer manuellement le curseur graphique de la barre pour sélectionner les moments historiques choisis : la scène affiche en temps réel les édifices existants au moment sélectionné. L'affichage de la géométrie dans la scène 3D est possible grâce à une fonction javascript qui calcule la correspondance entre la coordonnée graphique x de l'interface (exprimé en langage SVG) et la position dans la barre temporelle. La liste des édifices existants à chaque époque est affichée dans la page PHP (Figure 59 et Figure 65a).

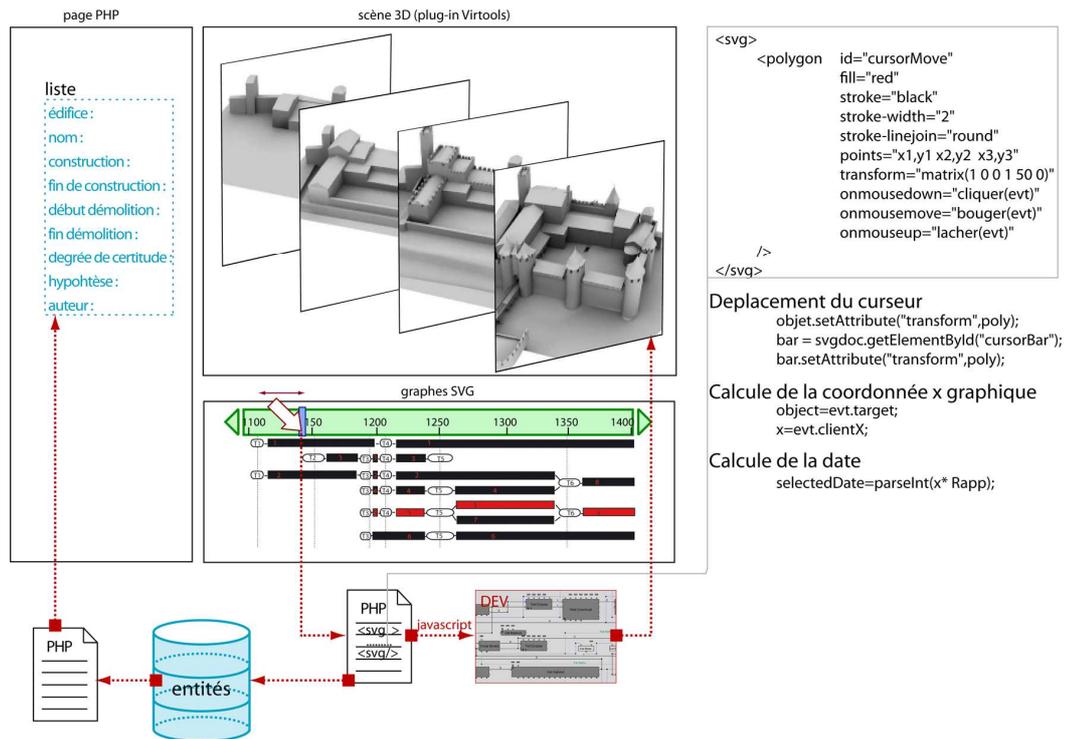


Figure 59. Schéma de fonctionnement de l'outil pour la sélection d'états historiques à partir de la barre temporelle.

6.3.3. La visualisation des évolutions

Au niveau graphique, l'interface dédiée à la gestion des évolutions (Annexe E) est constituée de trois parties : un repère pour le défilement temporel, un espace dédié à la gestion de l'historique des évolutions, et des boutons d'action.

L'espace des graphes. Cet espace est dédié à l'historique des évolutions. Les graphes permettent de visualiser les transformations subies par les édifices et leurs relations réciproques au fil du temps. Chaque donnée temporelle est rapportée à une valeur graphique afin d'afficher les graphes le long d'un repère temporel. Les divers graphes sont déterminés par un algorithme (voir Annexe G) qui, pour chaque entité et groupe d'entités :

- regroupe les dates constituant les transformations des édifices,
- calcule les intervalles entre deux dates successives,
- évalue pour chaque date de chaque édifice (ou groupe) si sa valeur concerne la création, l'existence, la démolition, la variation ou d'autres transformations ;
- crée en fonction de la caractérisation des dates, pour chaque intervalle de création, d'existence et de démolition identifiée, les cercles, les cercles arrondis et les rectangles correspondants aux états et aux transitions ;

- relie à chaque rectangle graphique constituant un état, la liste d'entités dont la période d'existence est incluse dans l'arc temporel représenté par le rectangle. Les entités correspondantes sont stockées dans un tableau qui les relie aux rectangles / groupes.

Repère temporel. Le repère temporel est dynamiquement adapté au projet sélectionné. Selon l'intervalle du site (années, décades, centaines, milliers d'années), sa granularité peut être augmentée ou réduite. L'utilisation de granularités temporelles différentes facilite la visualisation en permettant de positionner plus clairement l'historique des évolutions. Toutefois, ce repère ne correspond pas à une véritable barre temporelle : en effet les graphes sont seulement une représentation symbolique des modifications. En fonction de l'échelle de la barre (nombre d'années représentés), la dimension (exprimée en pixels) du symbole représentant une transformation temporelle ne correspond pas à la durée lisible sur la barre. Par exemple, une transformation ponctuelle sera toujours représentée par un cercle de 6 pixels, quelle que soit la durée de l'événement.

Les actions sur le traitement des évolutions. La partie inférieure de l'interface des graphes permet de trier les informations et de changer la modalité de visualisation à travers des outils qui servent à modifier la granularité spatiale, temporelle, et le niveau d'information. Au passage de la souris sur un graphe, les informations concernant l'élément, la position, les dates sont visualisées. De même, une description s'affiche au passage de la souris sur les outils de manipulation. Pour lire tout l'historique des graphes, qui parfois peut être très riche en nombre d'entités, un outil de *pan* permet de se déplacer dans l'espace global des graphes selon les 4 directions. Des flèches permettent un déplacement aisé le long de l'axe temporel en fonction d'un pas défini.

6.3.4. Interaction entre les graphes et la géométrie

Le principe des graphes dépasse la simple visualisation des cycles de vie entendus comme la succession d'états et de durées des artefacts. Depuis la construction d'un édifice jusqu'à sa démolition, chaque graphe garde l'historique des transformations, incluant les transformations complexes telles que l'union, la division, ou la reconstruction. De ce fait, chaque rectangle d'un graphe, descripteur bidimensionnel de la durée d'un état, est rattaché à une liste d'entités dont la durée de vie n'est pas inférieure à celle représentée par l'élément descripteur (le rectangle).

Si la description sémantique permet d'organiser les entités autour de groupes en fonction de critères temporels, le graphe sémantique fait donc le lien entre l'espace et le temps. Or, la notation de graphes historiques joue un rôle complémentaire à celui des groupes. Cette notation indique l'historique de chaque groupe : la position temporelle des entités géométriques et la dynamique de leurs transformations (Figure 60). De plus, plusieurs hypothèses de restitution peuvent être organisées autour d'un même état temporel. Les entités composant les graphes conceptuels peuvent alors être le dénominateur commun qui relie les représentations hypothétiques de la forme aux sources documentaires qui les justifient.

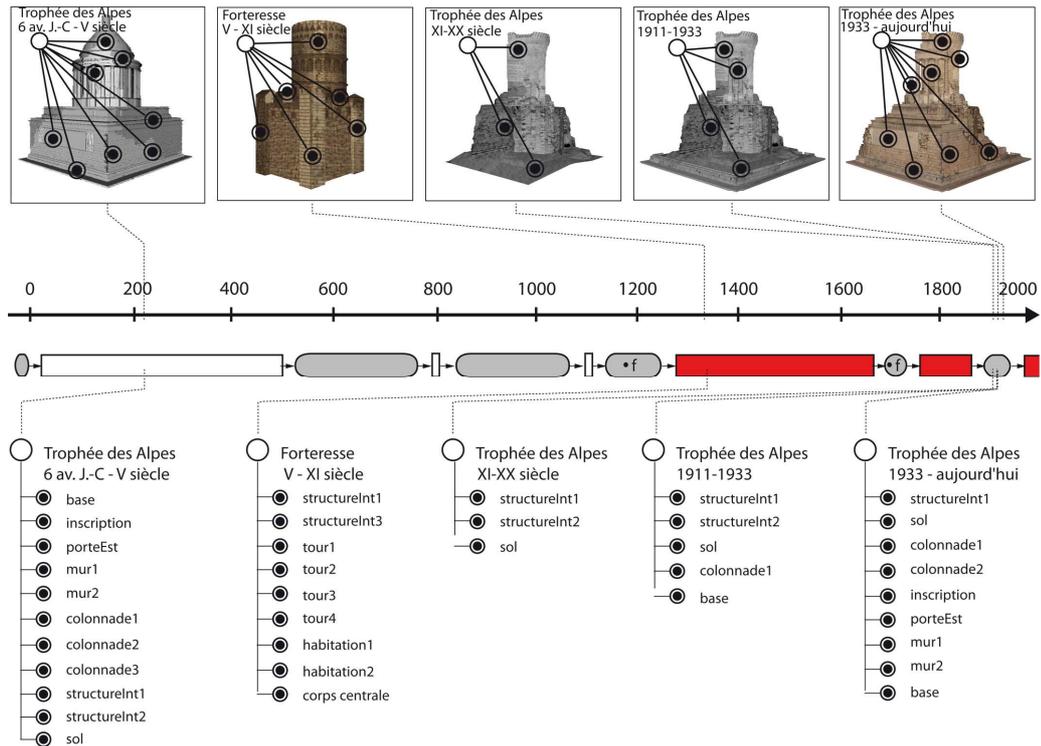


Figure 60. Représentation spatio-temporelle des transformations des édifices: en haut, représentations 3D et graphes sémantiques; en bas, notation des graphes historiques.

Interaction à partir de la géométrie. Chaque élément géométrique sélectionné dans la scène 3D est mis en évidence dans l'interface 2D (Figure 61) : le graphe correspondant est centré dans l'interface graphique et sa couleur est modifiée afin de faciliter son repérage. Au moment de la sélection d'une géométrie dans la scène 3D, un script java envoie l'identifiant de l'élément géométrique sélectionné à la page PHP, puis par le biais d'un autre script java le graphe relié à la sélection (selon l'identifiant) change de couleur. Au fur et à mesure que les entités sont sélectionnées dans la scène, la procédure affine la recherche et restreint le nombre de graphes répondant à la sélection multiple. Toutes les entités complémentaires à la sélection et reliées au graphe sont affichées dans la page PHP.

Interaction à partir des graphes. Vice-versa, chaque graphe sélectionné dans le système de visualisation 2D est activé et visualisé dans la scène 3D pour identifier la ou les formes géométriques correspondantes à la période décrite par la composante du graphe (Figure 62). Pour chaque graphe dynamique, les rectangles (générés à la volée) sont décrits par un identifiant et un nom. Grâce à des événements `onclick="SVGTalkToVirtools(evt)"` appliqués à la graphique vectorielle des graphes, au moment de la sélection d'un rectangle un script java modifie la couleur de l'élément (`var OBJ = object.setAttribute("fill", "red")`) et envoie la liste d'entités reliées (précédemment stockées dans un tableau) à la scène 3D. La liste d'entités (reliées dans un groupe morphologique temporel) est affichée dans la page PHP. Cette implémentation pour le Web permet d'interroger les graphes pour comprendre l'historique de chaque édifice, groupe d'édifices ou composante. Cet outil répond à la nécessité de joindre un support graphique complémentaire à la visualisation

tridimensionnelle géométrique, premièrement pour interagir avec la forme, deuxièmement pour comprendre les évolutions, et enfin pour trier les informations autour d'un élément architectural.

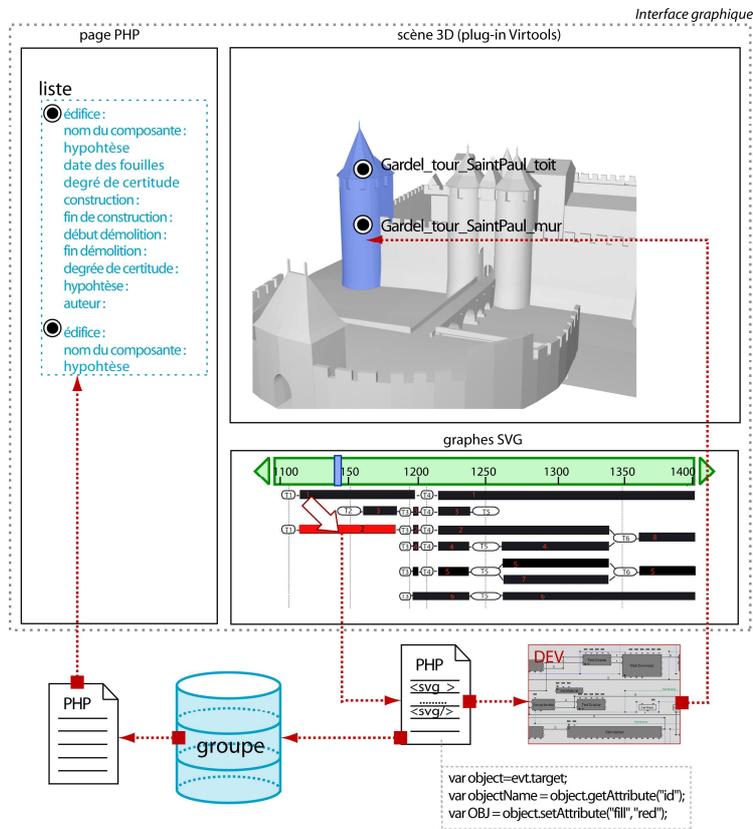


Figure 61. Schéma de fonctionnement de la sélection et de la consultation de l'historique à partir de la sélection de la géométrie.

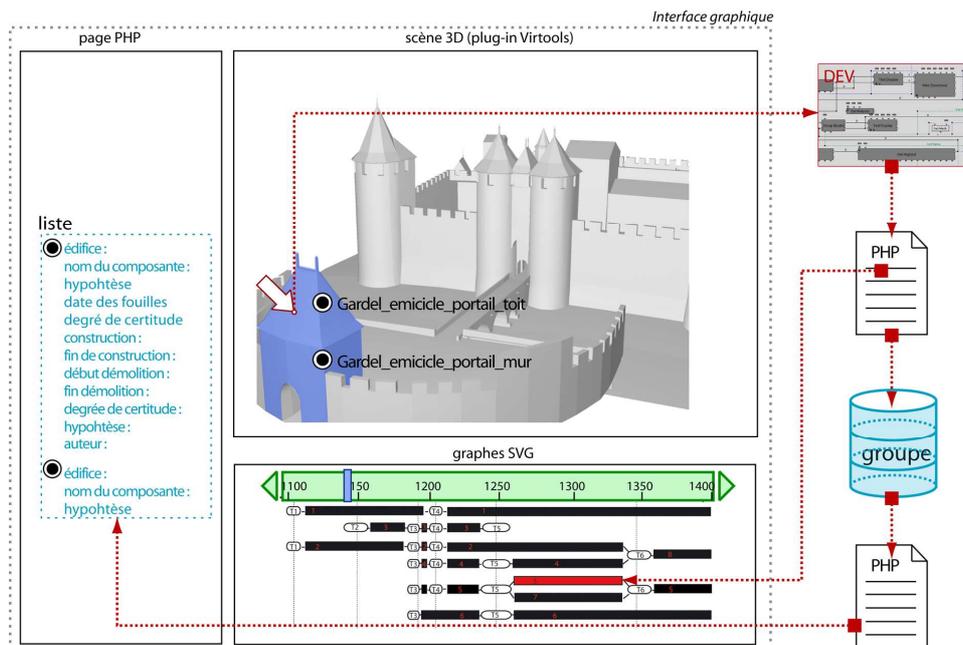


Figure 62. Schéma de fonctionnement de la sélection et de la consultation de la géométrie à partir de la sélection des graphes historiques.

6.3.5. Modification des résolutions des évolutions

Les transformations et les cycles de vies sont affichés à différentes échelles en fonction de la dimension de l'arc temporel sélectionné. De cette manière, les transformations de petite taille qui ne sont pas visibles à une grande échelle sont visibles à une résolution plus élevée. De même, les cycles de vie peuvent concerner les édifices, les groupes d'édifices ou leurs composantes. Tout particulièrement, le système permet d'afficher l'historique des édifices à travers les deux types de résolutions décrites dans 4.2.1.3 :

Les résolutions spatiales. Trois procédures permettent d'afficher respectivement les composantes des édifices, les édifices ou des groupes présélectionnés d'édifices. Le premier algorithme est basique et affiche seulement l'état d'existence de chaque composante, précédé et suivi par les deux transformations primaires (création, démolition) caractérisant les seules intervalles de transformations. Le rôle principal du deuxième algorithme (déjà décrit dans le paragraphe 6.3.3) est en priorité de séparer les éléments appartenant à différentes classes (groupes) pour ensuite calculer les transformations de chaque édifice, en se basant sur la table d'enregistrement des relations réciproques entre entités. Le troisième algorithme, qui calcule la visualisation des graphes sur des macro groupes, est une simple application de l'algorithme précédent à une sélection étroite d'entités.

Les résolutions temporelles. L'historique peut être plus ou moins simplifié grâce à un algorithme qui compare le nombre d'années avec le nombre de pixels correspondant à la position des deux dates dans l'interface graphique. L'algorithme sélectionne l'ensemble des dates sur un édifice et les ordonne en ordre croissant. Il prends en compte deux dates consécutives. A chaque comparaison de dates, si le rapport numérique est inférieur à un certain seuil, l'algorithme calcule l'appartenance des deux dates à la classe d'existence, de démolition ou de création. La comparaison de ces paramètres détermine si la date est prise en compte dans le système ou si elle est écartée pour analyser la date suivante dans la liste. En ce qui concerne le traitement de différentes résolutions temporelles, un travail de stage (Thueux 2009) conduit au sein du laboratoire a été mené sur l'algorithme de zoom permettant de filtrer l'affichage des informations liées aux graphes en fonction de l'intervalle temporel visualisé.

6.4. Outils de consultation et manipulation en fonction des critères temporels

Suite à la sélection d'un certain nombre d'entités en fonction de critères temporels, les entités géométriques peuvent finalement être consultées et manipulées en fonction de divers points de vue. La maquette spatio-temporelle permet de poser d'autres questionnements, en fonction des spécificités du site historique (Stefani et al. 2010; Stefani et al. 2010). Ces enquêtes, décrites par la suite, concernent tout particulièrement :

- la comparaison de plusieurs états historiques ;

- la visualisation et manipulation des hypothèses ;
- la visualisation de divers types d'incertitude.

Afin de visualiser la maquette en fonction des critères choisis, nous nous appuyons sur les restitutions en base polyédrique et, à travers des procédures, nous modifions les paramètres de saturation, émissivité et opacité en fonction des attributs qualitatifs reliés aux entités géométriques pendant la phase de modélisation. Ces attributs sont utilisés comme entrées pour une représentation dynamique basée sur des techniques de visualisation d'informations. Nous décrivons différents points de vue (objectifs) qui nécessitent des types variés de visualisation (en transparence ou en code couleurs).

6.4.1. Visualisation des états temporels

Dans la scène 3D, un *codage de couleurs* peut être utilisé dans le but de mieux distinguer les entités des bâtiments ayant des temporalités différentes (Figure 65b). Pour la coloration des états temporels nous avons mis au point deux types de visualisation :

- *Coloration proportionnelle* aux dates : les nuances de couleurs sont proportionnelles aux dates de constructions des édifices.
- *Coloration non proportionnelle* aux dates : l'attribution des nuances est discrétisée avec un pas fixe qui ne dépend pas de la distribution temporelle des dates le long de l'arc temporel du projet.

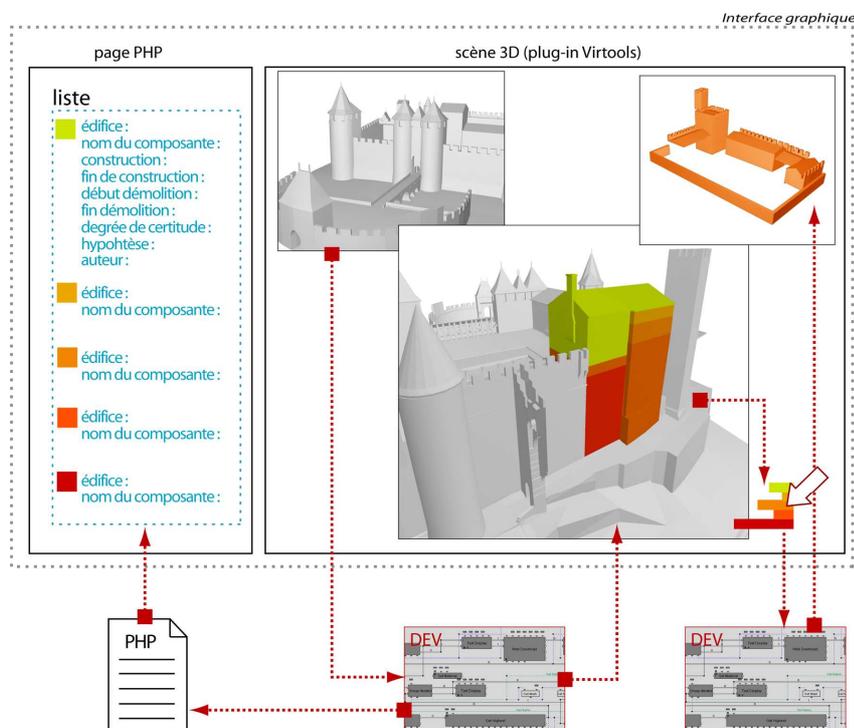


Figure 63. Schéma de fonctionnement de l'outil de visualisation et isolement d'entités appartenant à divers états temporels.

Les nuances des couleurs doivent être adoptées selon le contexte spécifique à un lieu : peut être nécessaire de visualiser les éléments architecturaux selon un rapport proportionnel ou non proportionnel entre le rang de dates et l'intervalle de couleur. Si par exemple les dates sont trop proches, une visualisation par couleurs proportionnelles aux dates n'aboutira pas à un résultat efficace. Une fois choisi le critère de coloration, un script DEV isole et ordonne les dates de construction des éléments géométriques sélectionnés, calcule l'indice de pourcentage correspondant à chaque date, et enfin attribue une saturation et une couleur aux entités géométriques en fonction de leur attribut temporel de construction. Cet indice est enregistré dans une table interne à Virtools et envoyé par l'intermédiaire d'un script java à une page PHP qui gère son insertion dans la base de données. A partir de telles valeurs stockées dans une table de Virtools, la procédure attribue en fonction de la date de construction une couleur (exprimé par un pourcentage) qui est appliquée au matériau (paramètre de diffusion) de chaque entité géométrique de la scène. Chaque matériau est stocké dans la table de Virtools afin de manipuler à tous moments plusieurs visualisations abstraites.

Une fois les états visualisés à travers des codes couleurs, le système affiche des légendes de couleurs qui permettent des recherches ultérieures :

- La *distinction* des seules entités géométriques construites à chaque état. Ceci est possible en sélectionnant dans la légende la couleur correspondante à celle assignée à la période à isoler. La liste des éléments géométriques est affichée dans la page PHP.
- La *visualisation du nombre de modifications* produites à des dates précises. La longueur de la légende (en bas à droite dans la Figure 63) permet d'apprécier visuellement si le nombre de modifications à chaque époque était important ou moins significatif. Ceci est utile par exemple quand le nombre de modifications est si élevé que leur perception est perdue.

L'isolation des éléments dans la scène 3D et le calcul sur le nombre de modifications subies par les édifices est faite à partir des scripts DEV. La table de Virtools stocke pour chaque entité géométrique le matériau appliqué, le pourcentage en fonction des dates et la couleur correspondante exprimée en valeurs RGB. Un script DEV permet de calculer le nombre d'entités géométriques correspondantes à chaque période et ensuite d'isoler à la volée les éléments géométriques en fonction de leur couleurs. Les détails concernant les éléments visualisés sont affichés dans la page PHP.

6.4.2. Visualisation et manipulation des hypothèses

Quand il s'agit de restitutions hypothétiques, la base de données stocke la liste d'entités sélectionnées dans une table temporaire qui est utilisée comme passerelle d'informations vers la scène 3D. Pour chaque entité, sont stockés les attributs la qualifiant en tant que restitution hypothétique ou certaine et le niveau de fiabilité spatial et temporel de la restitution. Grâce à des scripts DEV, l'utilisateur peut choisir d'attribuer à la maquette une couleur et une opacité pour chaque hypothèse. Ces

options, enregistrées temporairement dans une table en Virtools, sont décrites par la suite.

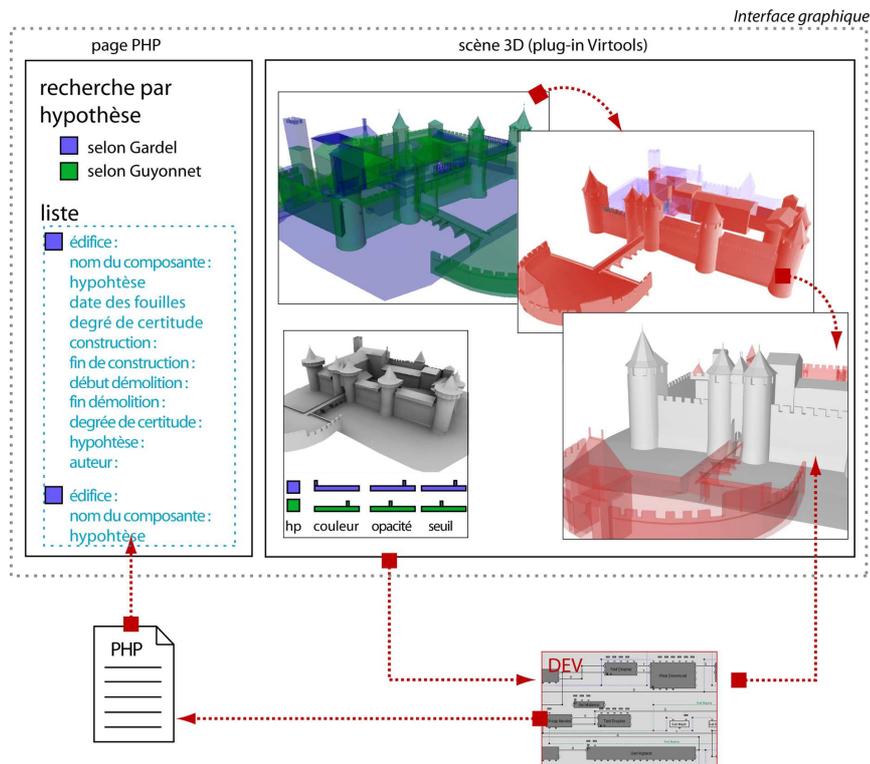


Figure 64. Schéma de fonctionnement de l'outil pour visualiser, isoler et comparer les hypothèses.

Isolation des hypothèses. Si des restitutions hypothétiques existent, le système permet leur isolement dans un menu dédié à leur visualisation (Figure 64c). Des procédures permettent de :

- *isoler* et *superposer* les diverses hypothèses pour les visualiser dans la scène ;
- *modifier la couleur* de visualisation de chaque hypothèse en temps réel (dans le cas où plusieurs hypothèses sur un site existent, afin de les distinguer les unes des autres) ;
- *modifier l'opacité* de visualisation de chaque hypothèse en temps réel.

La modification de ces paramètres permet de différencier les éléments certains de ceux qui sont flous. Cette opération permet d'apprécier la superposition de diverses hypothèses d'un même complexe d'édifice, d'en constater les diversités ou les similarités. Cette opération peut être couplée à d'autres outils pour formuler une requête : à titre d'exemple, les diverses étapes temporelles hypothétiques.

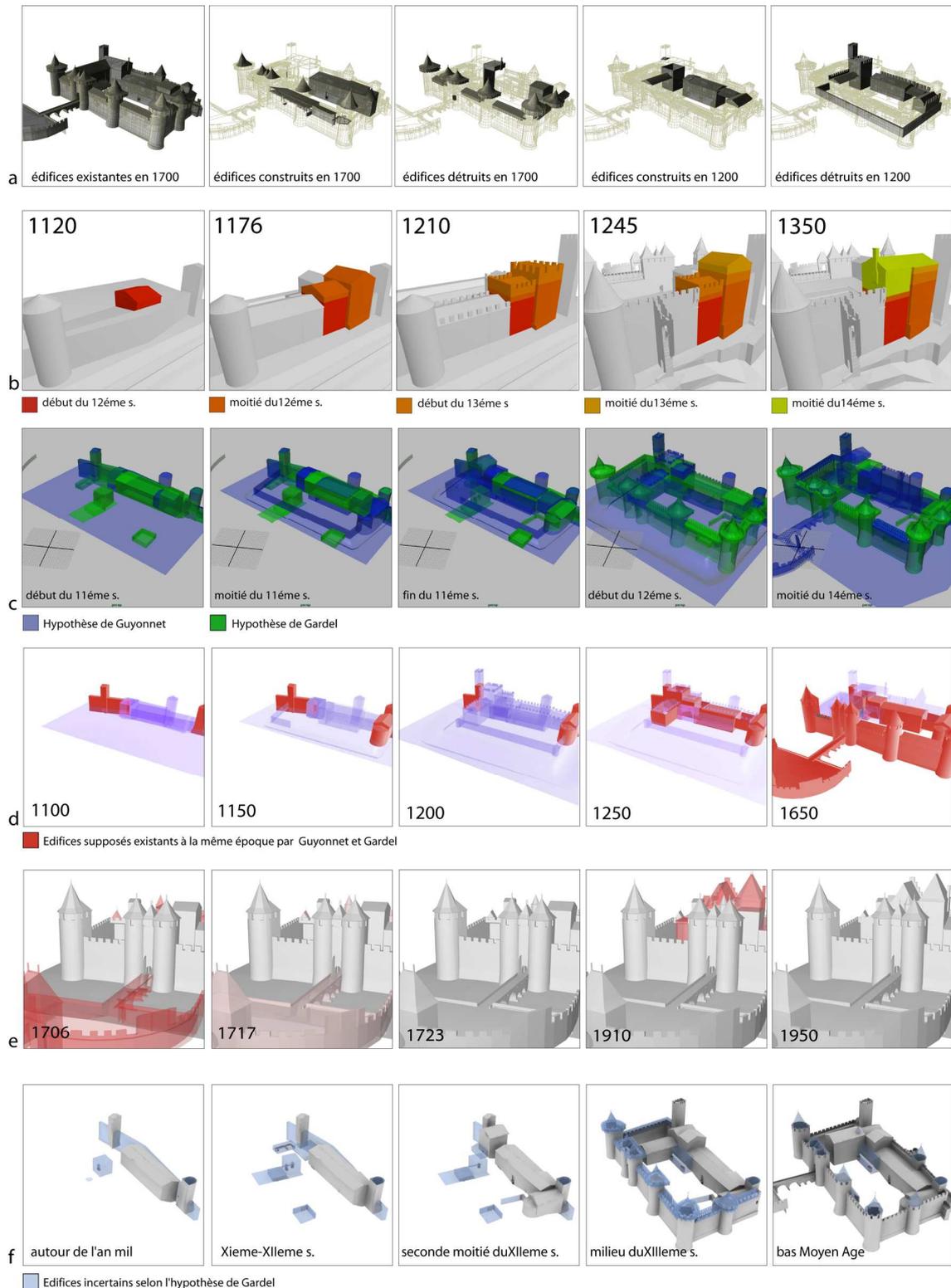


Figure 65. a) Visualisation d'édifices sélectionnés à travers des requêtes temporelles ; b) Visualisation des évolutions de deux édifices à Carcassonne par un code de couleurs : les éléments géométriques plus anciens sont représentés en rouge, les parties plus récentes en jaune ; c) Superposition des hypothèses de Guyonnet et Gardel visualisées à travers des transparences ; d) Visualisation de l'hypothèse de Guyonnet : les édifices existants sur le site de Carcassonne à une certaine époque selon Guyonnet et Gardel sont visualisés en rouge ; e) Visualisation des états incertains de construction et de démolition à l'aide de transparences ; f) Visualisation des volumes hypothétiques incertains dans l'hypothèse de Gardel.

La comparaison des restitutions hypothétiques. La visualisation des diverses suppositions sur le même site (Figure 64d) permet de constater l'accord ou le désaccord entre experts. Il arrive que la seule superposition entre hypothèses se révèle inefficace et faible. En revanche, isoler les composants hypothétiques sur lesquelles les experts sont en accord peut devenir une clé de lecture. Cette opération, entièrement gérée dans la scène 3D, permet d'interroger le système pour connaître quels sont les artefacts hypothétiques sur lesquelles les experts concordent par datation, forme et position.

Visualisation du niveau d'incertitude autour d'une hypothèse. Cet outil permet de distinguer les divers niveaux de certitude concernant une hypothèse (Figure 64e,f) : ils sont visualisés par des variations de l'opacité de l'entité et sont gérés dans la scène 3D. Le curseur permet d'afficher des informations sur l'élément sélectionné. La page PHP affiche des renseignements sur la cause de l'incertitude si est connue.

6.4.3. Visualisation des incertitudes spatiales

La restitution peut manifester des informations sur le *degré de certitude* attribué à la maquette en fonction des sources et du processus interprétatif adopté pour la restitution. Afin de distinguer les éléments incertains, nous utilisons différents niveaux de diffusion. La représentation 3D peut afficher l'état de connaissance effectif sur la restitution à une certaine époque. Le niveau d'incertitude est exprimé à travers un code visuel de couleurs portant sur les propriétés d'ombrage et de diffusion de la lumière du matériau rattaché aux entités. Le paramètre de diffusion varie donc en fonction de l'attribut de certitude affecté à l'entité géométrique. Quatre niveaux de diffusion sont utilisés :

- Niveau 1 (diffusion 100%). Entités géométriques reconstruites à partir de données de terrain telles que l'acquisition laser ou photogrammétrique.
- Niveau 2 (diffusion 75%). Entités géométriques reconstruites à partir d'images en perspective ou en projection orthogonale. Les formes sont modélisées en se basant sur les éléments géométriques connus de l'état actuel, à travers les opérateurs de *modification*, *duplication* et *création*.
- Niveau 3 (diffusion 50%). Entités géométriques reconstruites à partir d'images en pseudo perspective ou pseudo axonométrie. Leurs formes sont modélisées à travers les opérateurs de *création* en se basant sur des techniques d'acquisition à partir d'images sans le support métrique ni géométrique des éléments connus.
- Niveau 4 (diffusion 25%). Entités géométriques reconstruites sans support iconographique ou de données de terrain. Les formes sont modélisées par déduction, en supposant la forme à partir de fragments, ou par analogie, en supposant la forme par similitude avec d'autres artefacts connus.

6.4.4. Visualisation des incertitudes temporelles

La notation temporelle peut manifester des informations sur le degré de certitude attribué aux évolutions en fonction des sources. Afin de distinguer les périodes incertaines, nous utilisons les dégradés de couleurs. La notation peut afficher l'état de connaissance effectif sur la durée des transformations qui se sont succédées. Le niveau d'incertitude est exprimé à travers une convention graphique : le remplissage indique la certitude de la durée de la transformation ou de l'état ; en revanche le dégradé vers la transparence indique que la transformation ou l'état ont position temporelle ou durée incertaines. La fin du dégradé correspond au moment temporel à partir duquel la transition ou l'état est certain. Elle dépend également des informations véhiculées par les sources (Figure 66).

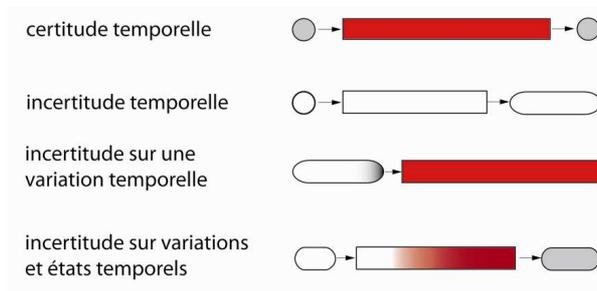


Figure 66. Représentation de l'incertitude temporelle par le biais de graphes historiques.

7. Conclusions et perspectives

Cette thèse a abordé la problématique fondamentale de la structuration, de la gestion et de la visualisation des évolutions spatio-temporelles des édifices patrimoniaux. Deux facteurs sont apparus. Premièrement, le patrimoine historique a démontré être en effet un terrain très propice à la discussion de la problématique spatio-temporelle à cause de la nature de la collecte d'informations plus ou moins incertaines qui s'étend sur des arcs temporels de centaines voire de milliers d'années. Cette approche peut donc répondre aux diverses exigences des figures sensibilisées à ce sujet, tels que architectes, archéologues, historiens ou un public générique qui est en train de se répandre. Deuxièmement, la visualisation d'états historiques multiples doit s'appuyer sur des systèmes de visualisation hybrides afin de visualiser et comprendre les évolutions au fil du temps. La démarche se développe autour de trois aspects : la structuration en fonction du temps, la consultation des informations et la visualisation des transformations. Les réflexions menées pendant cette thèse ont mis en évidence d'une part des limites et d'autre part des perspectives de recherche concernant ces trois aspects.

7.1. Limites

7.1.1. Granularité spatiale de la structuration

Cette thèse a mis en évidence le problème fondamentale de la granularité spatiale de la structuration. En effet l'approche de structuration proposée nécessite d'un modèle préalablement structuré en fonction d'un point de vue spécifique. Le point de vue (donc le type de structuration) est choisi à priori et correspond à celui de l'analyse requise. Toutefois, l'analyse au fil du temps peut révéler la nécessité de définir d'autres niveaux de granularité spatiale. Par conséquent, en fonction de l'observation et de l'analyse des époques temporelles, la structuration spatiale pourrait varier par rapport à celle établie initialement. Actuellement il manque une réponse claire sur comment faire varier la granularité spatiale de la structuration. Afin de répondre à ce questionnement, il faudrait travailler en contact avec des archéologues

dans le double objectif de formaliser le processus cognitif de connaissance des époques passées et d'établir comment faire varier la granularité spatiale.

7.1.2. Modélisation des évolutions

La solution explorée pour la visualisation des évolutions utilise un algorithme qui compare les dates concernant chaque composante/édifice/groupe. Le système de visualisation de graphes a une limite importante : la visualisation des transformations est possible si les transformations ne sont pas trop complexes, c'est-à-dire si le chevauchement entre transformations concernant les différents édifices est limité. En effet, pour gérer les transformations d'un point de vue graphique, suite à chaque requête, la liste des entités prises en compte est ordonnée en fonction des transformations qui se succèdent et relient les entités. Les édifices en relation réciproque doivent apparaître en ordre consécutif pour pouvoir afficher les liens. Actuellement, ces transformations sont représentables si un édifice au cours de sa vie est en relation avec un nombre limité d'autres édifices. De façon générale, quand il s'agit de représenter les transformations d'édifices, le nombre de transformations n'est pas élevé donc l'affichage des transformations est possible. En revanche, des méthodes plus robustes devront être adoptées si des transformations plus complexes seront prises en compte, comme par exemple dans la conception du bâtiment.

7.1.3. Sauvegarde de l'historique des évolutions

Le paragraphe 5.3.4.1 a posé des premières réflexions sur l'évolutivité du système. Deux aspects limitant le système méritent d'être soulignés. Premièrement, actuellement, si suite à la découverte d'une source une modification structurelle et une mise à jour du modèle est nécessaire les changements rétroactifs ne peuvent pas être identifiés : les anciennes relations entre entités sont perdues et si une entité géométrique subit une modification, aucune trace de son état précédent est sauvegardée. Deuxièmement, le processus de modification n'est pas automatique : la mise à jour des entités géométriques, de ses attributs et des relations dans la base de donnée est entièrement manuelle. Comme résultat, la nouvelle version d'une restitution géométrique substitue simplement la version précédente dans le système : en revanche, les anciennes versions devraient être enregistrées dans une table historique afin de sauvegarder l'évolution de la connaissance et de pouvoir revenir en arrière en cas de nécessité.

7.1.4. Topologie et granularité temporelle

Deux aspects limitent actuellement le système. D'une part, le système gère actuellement seulement certaines requêtes temporelles basiques. La formulation de requêtes pourrait être donc étendue à d'autres relations topologiques. L'intersection avec des relations complexes (par exemple *construit avant + détruit pendant*) permettrait d'agrandir la problématique de compréhension du temps à d'autres dynamiques qui relient les transformations physiques des édifices à des faits sociopolitiques ou économiques. D'autre part, la granularité de la barre temporelle ne s'étend pas au-delà de l'année : celle du mois et du jour n'est pas intégrée dans le système. En effet, d'une part cette dimension temporelle concerne peu de données,

d'autre part la visualisation des évolutions dans une interface réduite à une seule portion de la page Internet ne permet pas d'exploiter concrètement la visualisation de pas temporels extrêmement courts comme ceux du mois et du jour. Enfin, par rapport à des arcs temporels très grands comme ceux qui délimitent le cycle de vie des édifices historiques, l'arc temporel d'une journée et du mois perd l'intérêt.

7.1.5. Exploitation de l'historique des évolutions

Le grand avantage du système de graphes est sa conception en langage SVG pour la graphique vectorielle, qui, étant relié à des coordonnées cartésiennes, est modifiable et exportable. Toutefois, actuellement l'exploitation des graphes est limitée et deux aspects devraient être intégrés dans le futur. D'une part, ce système devrait permettre l'exportation de l'historique d'une ou plusieurs entités sélectionnées en format PDF afin de garder une trace de l'historique des sites. D'autre part, les graphes vectoriels pourraient devenir l'outil de modification dynamique des relations entre les entités de la base de données, par le biais de l'interface. L'interface permettrait la mise à jour des liens entre entités morphologiques et le stockage des relations directement dans la base de données.

7.2. Perspectives de recherche

Cette thèse a traité des thématiques qui ont leurs origines dans l'idée de construire un modèle qui soit véhicule d'informations. Tout particulièrement, l'étude étant basée sur l'évolution spatio-temporelle des édifices patrimoniaux, deux difficultés principales se sont révélées :

- Qualifier les éléments géométriques concernant les époques passées et disparues, à la fois par rapport à leur forme, leur position spatiale et temporelle;
- Etablir des liens spatiaux et temporels entre les divers éléments du système pour véhiculer et extraire des informations.

La difficulté, qui est en même temps l'attractivité de cet axe de recherche, est tout particulièrement liée à la prise en compte d'un ensemble très varié de données qui ne peut pas aboutir à un affichage d'informations de type statistique. Par conséquent, diverses perspectives peuvent être envisagées en continuité avec cette thèse. Les perspectives concernent les aspects hétérogènes suivants :

- La mise en relation de la maquette spatio-temporelle avec des sources iconographiques ;
- La spatialisation de l'incertitude de la maquette spatio-temporelle ;
- L'extension de la visualisation des graphes à d'autres domaines d'application.

7.2.1. Mise en relation des représentations passées avec l'iconographie

Dans un système d'informations qui affiche les évolutions historiques, les états passés pourraient être mis en relation directe avec les sources. Un travail de thèse est actuellement mené au sein du laboratoire Map afin d'effectuer divers types de

recherches de sources visuelles (Busayarat et al. 2008). La maquette 3D pourrait permettre l'accès aux informations sur l'édifice à travers sa morphologie. Le référencement spatial de sources iconographiques permettrait d'établir des relations entre des informations 3D et 2D. Cet outil permettrait de croiser les données et de visualiser le changement grâce à la superposition de deux états différents transmis par une restitution géométriques (3D) et une source (2D). Par conséquent, la recherche de l'iconographie pourrait être effectuée à partir de la sélection d'entités morphologiques ou d'un point de vue.

Recherche iconographique basée sur la sélection des entités. Le travail de (Busayarat et al. 2008) propose une méthode basée sur l'intersection visuelle afin de déterminer quelles images sont orientées aux objets. Ce système calcule l'intersection entre chaque champ de l'image et l'entité géométrique sélectionnée. Si la maquette 3D décrit tous les états passés d'un artefact, les sources iconographiques pourraient être mises en relations avec les diverses époques. Les résultats des requêtes pourraient apparaître selon deux critères, spatiaux et temporels. D'une part, si les sources sont référencées spatialement dans la scène, la distance entre chaque source iconographique et la camera pourrait être évaluée. D'autre part, si les sources sont référencées temporellement, la distance temporelle entre chaque source iconographique et l'entité morphologique sélectionnée pourrait être déterminée. Ce système permettrait de connaître et de visualiser à partir d'une source la position physique qui aurait du être occupée par une entité géométrique (Figure 67).

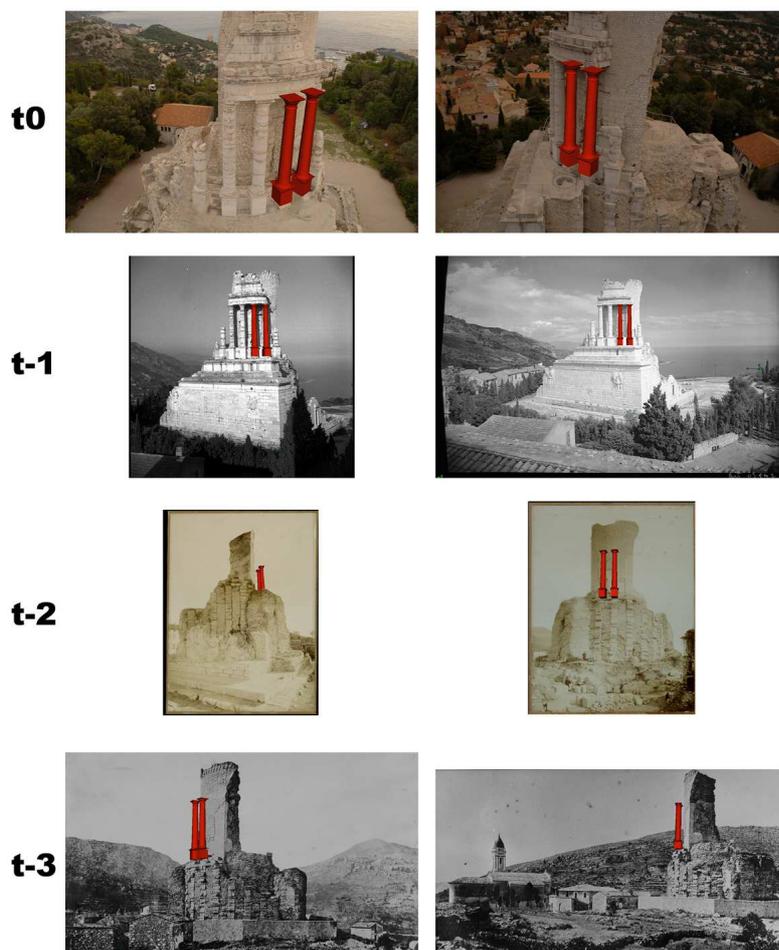


Figure 67. Recherche de sources iconographiques à partir d'entités.

Recherche iconographique basée sur le point de vue. Le travail de (Busayarat et al. 2008) propose la construction d'une représentation 3D du champ visuel de la caméra associée à chaque photo. Deux paramètres sont utilisés afin de filtrer les résultats de l'intersection : premièrement, la distance entre la caméra de navigation et la position de chaque centre optique concernant les sources, deuxièmement, l'angle entre l'orientation de la caméra de navigation et l'orientation de chaque source. Si les sources historiques sont intégrées dans le système, elles peuvent donc être détectées par intersection entre l'iconographie spatialisée et le champ visuel de la caméra d'observation. L'iconographie peut être visualisée à partir d'un point de vue : celui de la caméra de navigation dans la scène 3D (Figure 68). La distance temporelle entre l'état actuel (affiché dans la scène 3D) et l'état temporel concernant l'iconographie pourrait donc être calculée.



Figure 68. Comparaison de divers états temporels à partir d'une maquette 3D et d'une source iconographique.

7.2.2. Spatialisation de l'incertitude

La qualification de l'incertitude liée aux sources documentaires ne doit pas se limiter à une simple définition des paramètres qui la conditionnent. La comparaison entre les sources documentaires et l'état actuel d'un artefact peut induire à des considérations plus concrètes sur l'incertitude. Si la maquette est construite à partir des données de terrain, comparer les sources et les restitutions pourrait amener à un effort de spatialisation de l'incertitude. La spatialisation se traduit dans la description des paramètres suivants.

Incertitude spatiale de forme. En archéologie et patrimoine historique, la forme des éléments restitués à partir de fragments n'est pas toujours certaine. En effet, la restitution se base sur l'interprétation des fragments (Sideris & Roussou 2002), par analogie avec d'autres fragments connus ou par déduction de la forme géométrique. De plus, ces restitutions s'appuient sur des sources documentaires plus ou moins certaines qui permettent d'obtenir des niveaux variés de restitution géométrique. Dans ce cas, un niveau de fiabilité sur la forme pourrait qualifier la maquette afin de manifester les divers niveaux de certitude géométrique. La restitution hypothétique des galeries Sud et Est du cloître de l'Abbaye de Saint-Guilhem-le-Désert au XIIe siècle en offre un exemple (Figure 69). Leur géométrie a été reconstruite à partir des sources documentaires et sur la base des traces qui subsistent au sol.



Figure 69. Le Cloître de l'Abbaye de Saint-Guilhem-le-Désert. Restitution 3D de l'état actuel et reconstitution hypothétique du cloître au XIIe siècle.

Incertitude spatiale de position. Les restitutions à partir d'éléments dispersés posent d'autres questionnements : quand il s'agit d'effectuer une anastylose³⁰ physique ou numérique, l'incertitude sur l'appartenance d'un fragment à un groupe cause des problèmes d'interprétation sur la forme. Le décor sculpté recensé du cloître de l'Abbaye de Saint-Guilhem-le-Désert est actuellement dispersé entre trois lieux différents : la société archéologique de Montpellier, le Musée des cloîtres de New York et le musée lapidaire de St. Guilhem-le-Désert. La connaissance de l'architecture de ce cloître permet actuellement la restitution 3D de l'état actuel et la reconstitution hypothétique du cloître au XIIe siècle. La numérisation des éléments conservés dans les divers musées a permis d'effectuer une anastylose virtuelle sur la reconstitution de certaines arcades d'une galerie du cloître (Figure 70). Toutefois, leur position n'étant pas certaine, ces éléments pourraient afficher un niveau d'incertitude liée à la position des entablements, des claveaux et des chapiteaux dans le cloître et à leur appartenance à une arcade.

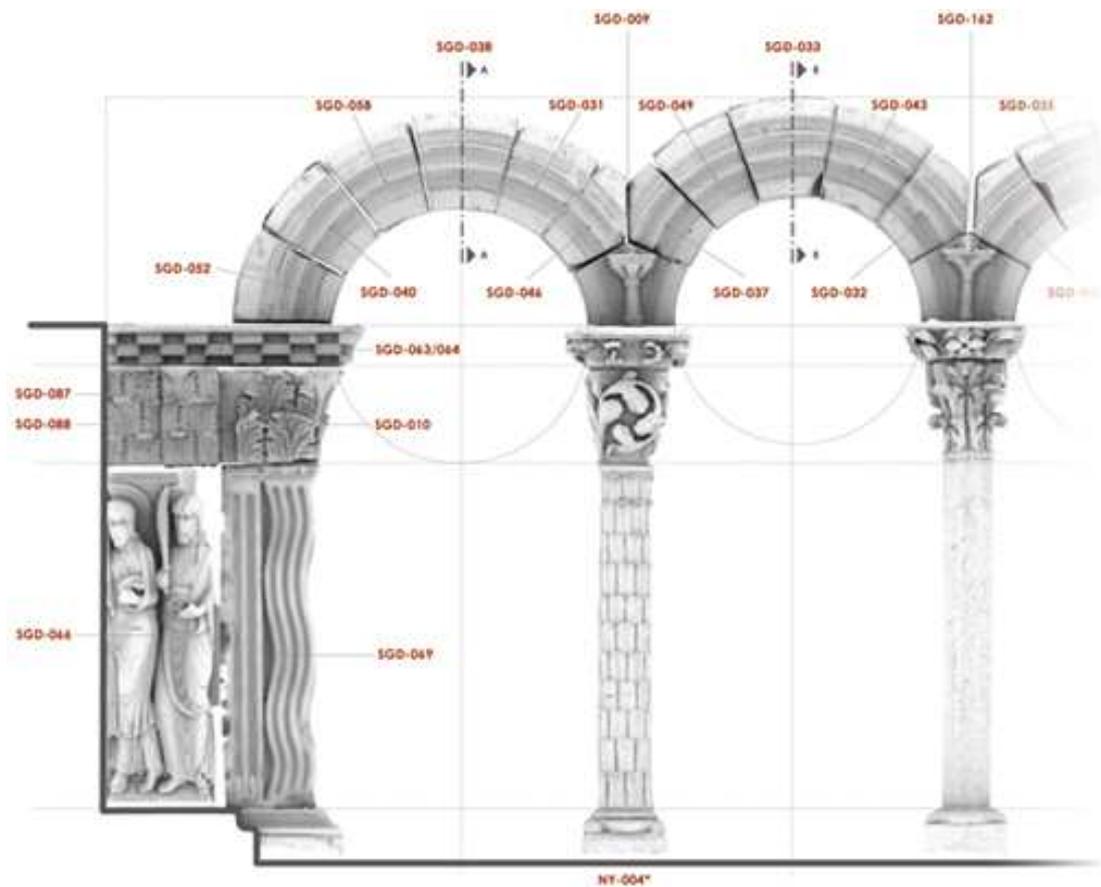


Figure 70. Anastylose virtuelle des fragments du cloître de Saint Guilhem le Désert.

Visualisation des diverses solutions spatiales. Sur la base des deux propos précédents, illustrer les diverses incertitudes d'une restitution hypothétique se révèle la première étape d'une démarche qui permet de montrer les diverses solutions spatiales possibles. Une interface qui décrit les incertitudes spatiales pourrait illustrer non

³⁰ restitution d'un état passé d'un artefact, un décor ou un groupe sculpté sur la base des fragments conservés.

7.2.3. Résolutions multiples en fonction des sources

La restitution des états historiques à partir des sources iconographiques ouvre une autre perspective de recherche. A partir du moment où la dimension temporelle est prise en compte, la restitution d'une époque passée documente l'apparence d'un édifice à un moment précis dans le temps en se basant sur les sources utilisées pour la restitution. Le patrimoine historique est un domaine pour lequel la découverte de sources peut faire varier sensiblement la connaissance d'un lieu. Le degré de connaissance rattachée à une représentation peut donc évoluer au fil du temps. Le système devrait être adapté afin de visualiser les diverses restitutions effectuées en fonction des sources sur un même état temporel. De ce fait, au fur et à mesure que le niveau de connaissance augmente sur un site, la représentation devrait s'adapter pour afficher la progression de la connaissance. En fonction du niveau d'informations véhiculées par les sources, le système devrait afficher :

- des modèles géométriques structurés ayant des résolutions multiples en fonction des sources ;
- des versions géométriques différentes, si les sources sont discordantes ;

Cet axe de recherche pose le problème fondamentale de la granularité spatiale de structuration posé dans le paragraphe 7.1.1.

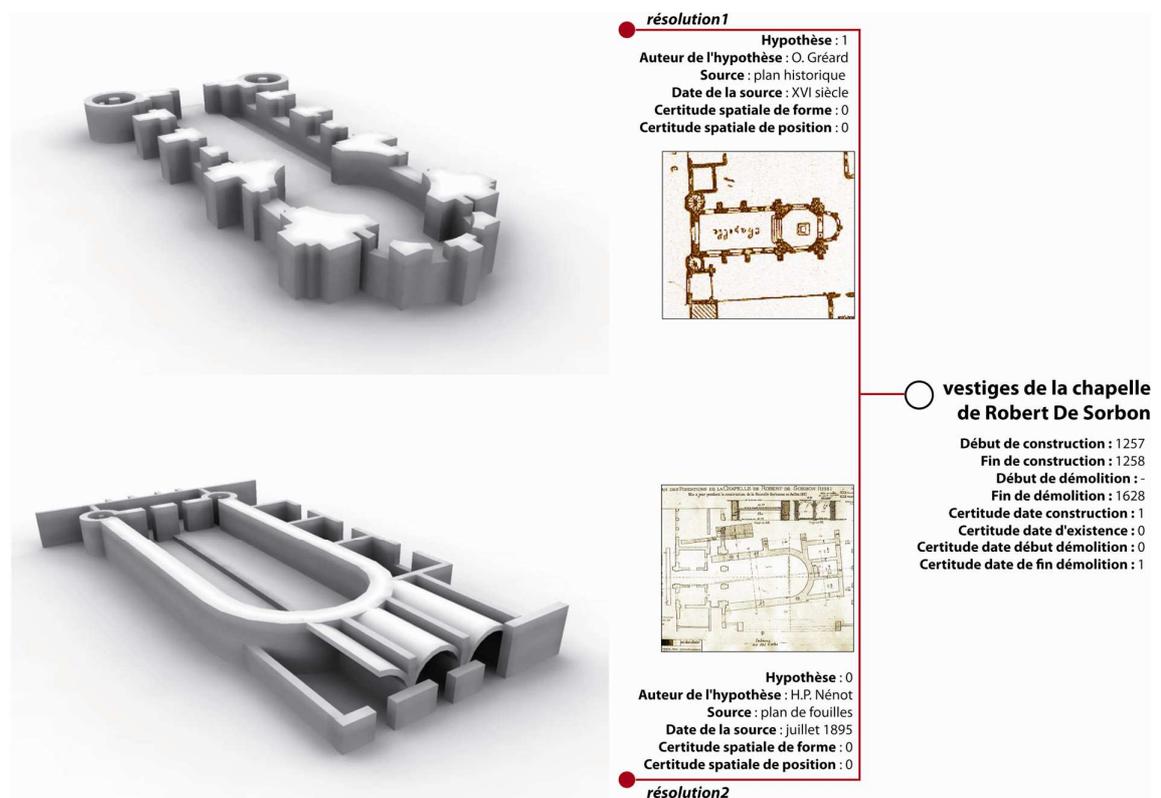


Figure 72. Représentation des vestiges de la Chapelle de R. De Sorbon à Paris. La première correspond à la restitution sur la base d'un plan historique du XVI^e siècle ; la deuxième est effectuée sur la base de la découverte des fondations pendant la reconstruction des édifices de la Cours de la Sorbonne en 1896.

7.2.4. Graphes historiques tridimensionnels

Actuellement les graphes sont décrits dans un système bidimensionnel de coordonnées cartésiennes où le temps correspond à l'axe horizontal et le nombre de bâtiments détermine l'axe vertical. Comme chaque graphe représente un certain nombre d'éléments architecturaux composant chaque bâtiment à chaque étape historique, ces graphes pourraient être ainsi décrits par la troisième dimension qui permettrait d'afficher chaque composante directement sur la portion de graphe. De cette façon, la sélection d'une stratification d'un graphe comporterait la visualisation de la composante morphologique directement dans la scène 3D. Inversement, la visualisation des graphes 3D permettrait de comprendre la caractérisation sémantique et de quantifier les composantes de chaque entité. Les différentes hauteurs des graphes seraient déterminées par le nombre de composantes caractérisant chaque époque temporelle et chaque état. Un système de graphes 3D similaire (Shubert 2008) a été utilisé pour représenter le processus de conception numérique de *l'Embryological House* de l'architecte Greg Lynn (Figure 73).

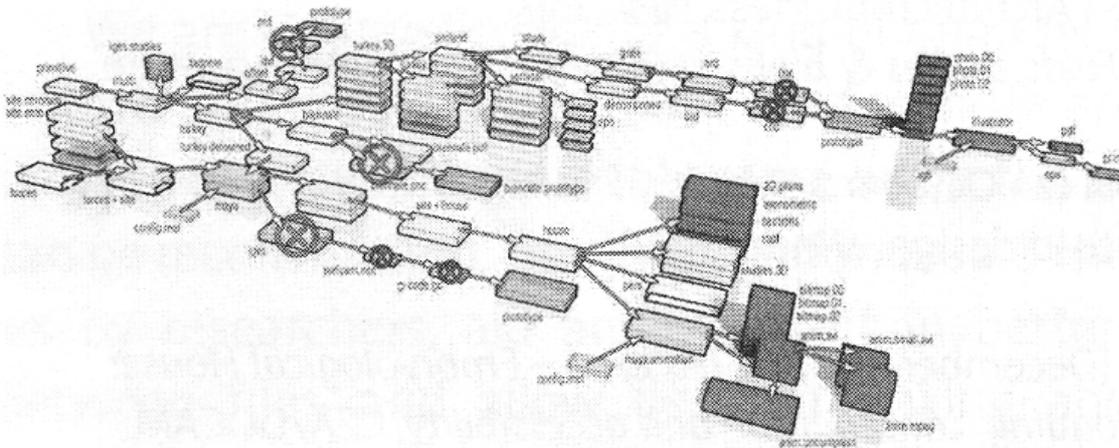


Figure 73. Reconstruction du processus de conception numérique de *l'Embryological House* de l'architecte Greg Lynn.

7.2.5. Domaines d'application

Dans le cadre de cette thèse, nous avons fait le choix initial de représenter les édifices. Toutefois, la représentation des évolutions peut concerner diverses échelles : celle urbaine (macro échelle), de l'édifice et de l'objet (micro échelle). Le système de visualisation de graphes pourrait être appliqué à d'autres secteurs du domaine patrimonial, où les transformations pourraient s'avérer diversifiées par rapport à celle dominant les édifices, et à des échelles différentes (Annexe A). Les secteurs adaptés à ce type de représentation sont les suivants.

Restauration. La dégradation des matériaux des édifices ou des fresques pourrait être décrite par un système de graphes. Par exemple, dans la restauration des fresques, les types d'interventions définissent comment stabiliser l'état actuel d'une fresque, freiner le processus de dégradation et enfin comment effectuer la réintégration picturale³¹ afin de représenter esthétiquement l'œuvre. Ces techniques permettent de retarder l'état de vieillissement de l'œuvre. Trois temps pourraient être visualisés à l'aide des graphes : le temps de réalisation de la peinture, le temps décompté et le temps présent. Les graphes pourraient établir le lien entre les informations visuelles sur les dégradations et les diverses phases de restauration.

Archéologie. En archéologie ce système pourrait bien s'adapter à la représentation des fouilles archéologiques : l'historique des fouilles pourrait être retracé depuis leur découverte dans la campagne archéologique jusqu'à leur déplacement dans différents musées ou leur remise en place dans le lieu supposé comme originaire. Dans ce sens, les graphes pourraient décrire l'entité entière ou ses sous composants et les relations d'appartenance à un groupe.

Conception. A l'échelle architecturale, ce genre de graphes pourrait décrire les divers états de conception d'un bâtiment, qui s'étendent de l'idée du projet jusqu'à la vente du bien immobilier. De ce fait, dans les différentes étapes de la conception d'un édifice, des données très variées pourraient être collectées afin de représenter les diverses phases et la chronologie des évolutions. Un corpus hétérogène de données permettrait de tracer l'historique documentant les choix et les variations du projet : les premiers croquis du projet et des photographies décrivant le site, les dessins vectoriels et les modèles 3D produits à l'aide de la CAO (plans, coupes, vues de face, images de synthèse, etc.), et jusqu'à la collecte photographique documentant le chantier de construction. Les graphes pourraient alors illustrer les diverses modifications du projet et celles effectuées en cours de construction.

Planification urbaine. A l'échelle de la ville et du territoire, le système de graphes pourrait être employé pour représenter les changements au niveau des quartiers et des îlots : la démolition des édifices, leur remplacement, leur changement de fonction, la création de nouveaux pôles, la rénovation de bâtiments ou encore leur adaptation à des normes écologiques. Dans ce sens, les entités morphologiques attachées aux graphes ne seront pas les composantes géométriques d'édifices mais plutôt les édifices entiers.

Domaine médical. Actuellement, dans le domaine médical, le suivi chronologique de l'évolution de la maladie d'un patient est appliqué seulement aux données visuelles de l'imagerie médicale, telles que les radiographies ou l'IRM. En revanche, le suivi du patient pourrait inclure tous ses antécédents. De ce fait, une collecte de données très diversifiées pourrait être reliée, incluant non seulement des données visuelles mais aussi tous types de rapports médicaux et de bilans de santé témoignant de l'évolution du corps humain.

³¹ L'opération de réintégration picturale a pour objectif de reconstituer l'image manquante, à travers les opérations de masticage et de retouche.

7.3. Réflexions conclusives

Pour résumer le travail de recherche effectué, l'outil numérique offre diverses possibilités de représentation des états historiques : la numérisation 3D à partir de données du terrain (pour les états existants) et à partir de sources iconographiques (pour les états disparus) est la première étape d'un processus de structuration et d'interprétation de la forme qui est à la base de chaque restitution. Ce processus répond à diverses préoccupations : premièrement, la conservation et l'archivage des données patrimoniales, constituées de restitutions 3D et des sources documentaires plus ou moins anciennes ; deuxièmement, l'analyse et la comparaison de données selon divers points de vue dictés par les domaines d'étude, et enfin la valorisation des données archivées, afin de partager avec le grand public les connaissances du patrimoine historique. Afin de valoriser le patrimoine historique et de rendre complètement accessible les données à un public de plus en plus hétérogène, des enquêtes pourraient être envisagées pour vérifier la compréhension des systèmes appliqués à l'architecture.

Bibliographie

- Aigner, W. et al., 2007. Visualizing time-oriented data-A systematic view. *Comput. Graph.*, 31(3), 401-409.
- Aigner, W. et al., 2005. PlanningLines: Novel Glyphs for Representing Temporal Uncertainties and Their Evaluation. Dans *Proceedings of the Ninth International Conference on Information Visualisation*. IEEE Computer Society, pp. 457-463.
- Allen, J.F., 1984. Towards a general theory of action and time. *Artif. Intell.*, 23(2), 123-154.
- Anile, A.M. et al., 2000. Modeling uncertain data with fuzzy B-splines. *Fuzzy Sets and Systems*, 113(3), 397-410.
- Astrachan, O. & Rodger, S.H., 1998. Animation, visualization, and interaction in CS 1 assignments. *SIGCSE Bull.*, 30(1), 317-321.
- Austin, J., 1962. *How to do things with words* Harward University Press., Cambridge MA.
- Beck, J., 2004. *Animation Art: From Pencil to Pixel, the World of Cartoon, Amime and CGI* Fulhamm London.: Flame Tree Publishing., London: Collins Design.
- Bernard, J., 2007. Du stade de Domitien à la Piazza Navona: l'architecture et son image. Dans *Virtual Retrospect 2007*. Bordeaux, France: Ausonius éditions, pp. 149-155.
- Bertin, J., 1967. *Sémiologie Graphique - Les Diagrammes, Les Réseaux, Les Cartes*, Paris: Gauthier-Villars.
- Blaise, J., Dudek, I. & Driscu, T., 2008. Infosphere: one artefact, two metaphors, three sort criteria. Dans *Digital Heritage - Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*. Larnaca, Chypre, pp. 362-367.
- Blaise, J., 2003. *Le formalisme objet appliqué à l'étude de l'édifice patrimonial : Problèmes de modélisation et d'échanges de données sur le réseau Internet*.
-

Architecture. Université de droit, d'économie et des sciences - Aix-Marseille III.
Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00268228>.

- Boden, M., 2006. *Mind As Machine: A History of Cognitive Science*, Clarendon Press.
- Bonfatti, F. & Monari, P.D., 1994. Spatio-temporal Modeling of Complex Geographical Structures. Dans *Proceedings of the IFIP TC5/WG5.11 Working Conference on Computer Support for Environmental Impact Assessment*. North-Holland Publishing Co., pp. 49-60.
- Breunig, B. et al., 2002. 5th AGILE Conference on Geographic Information Science. Dans *Geographic Information Science*. Palma (Mallorca), Spain, pp. 195-204.
- Busayarat, C. et al., 2008. An on-line system to upload and retrieve architectural documents based on spatial referencing. Dans *IDMME - Virtual Concept 2008 Conference*. Beijing, China.
- Bustany-Leca, C. & Bustany, D., 2005. Vers une vision du forum d'Auguste. Dans *Virtual Retrospect 2005*. Biarritz, France: Ausonius éditions, pp. 103-106.
- Card, S.K., Mackinlay, J. & Schneiderman, B., 1999. *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*, San Francisco: Morgan Kaufmann.
- Cariou, G., 2005. The three temples of the northwest end of the Roman Forum: Architectural Reconstruction and Topographic simulation. Dans *Virtual Retrospect 2005*. Biarritz, France: Ausonius éditions, pp. 96-101.
- Carrozzino, M., Evangelista, C. & Bergamasco, M., 2009. The immersive time-machine: a virtual exploration of the history of Livorno. Dans *3D-ARCH 2009: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures"*. Trento, Italy: Fabio Remondino, Sabry El-Hakim, Lorenzo Gonzo.
- Cheyland, J., 2007. Les processus spatio-temporels : quelques notions et concepts préalables à leur représentation. *Mappemonde*, 87(3-2007), 1-21.
- Chi, E.H. et al., 1998. Visualizing the evolution of Web ecologies. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. Los Angeles, California, United States: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 400-407.
- Criminisi, A., Reid, I. & Zisserman, A., 2000. Single View Metrology. *Int. J. Comput. Vision*, 40(2), 123-148.
- De Luca, L., 2006. *Relevé et multi-représentation du patrimoine architectural : définition d'une approche de reconstruction 3D d'édifices*. Engineering. ENSA Marseille. Available at: <http://www.map.archi.fr/ldl/publicationsFR>.
- De Luca, L. et al., 2010. An Iconography-Based modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage. Dans *Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling International*. Aix-en-Provence.
- De Luca, L. et al., 2008. NUBES: une plateforme intégrée pour la description, l'analyse, la documentation et le partage de représentations numériques d'édifices architecturaux. Dans *Architecture et archives numériques. L'architecture à l'ère du numérique : un enjeu de mémoire*, Peyceré D, Wierre F.

- De Luca, L. et al., 2007. An integrated framework to describe, analyze, document and share digital representations of architectural buildings. Dans *VAST2007 - Future technologies to empower heritage professionals*. Brighton, UK.
- Debevec, P.E., Taylor, C.J. & Malik, J., 1996. Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry- and image-based approach. Dans *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, pp. 11-20.
- Debois, E., 2003. *Interrogation de bases de données spatiotemporelles : Conception d'un outil de visualisation des réponses aux requêtes*, Bruxelles: Université Libre De Bruxelles. Faculté des Sciences Appliquées Ecole Polytechnique.
- Doleisch, H. et al., 2004. Case study: Visual analysis of complex, time-dependent simulation results of a diesel exhaust system. Dans *6th Joint IEEE TCVG - EUROGRAPHICS Symposium on Visualization*. Konstanz, Germany: IEEE Computer Society, pp. 91--96.
- Döllner, G., Kellner, P. & Tegel, O., 2000. Digital Mock-Up And Rapid Prototyping In Automotive Product Development. *J. Integr. Des. Process Sci.*, 4(1), 55-66.
- Dragicevic, P. & Huot, S., 2002. SpiraClock: a continuous and non-intrusive display for upcoming events. Dans *CHI '02 extended abstracts on Human factors in computing systems*. Minneapolis, Minnesota, USA: ACM, pp. 604-605.
- Du Mouza, C. & Rigaux, P., 2000. Bases de Données Spatio-Temporelles. Dans *Documents et évolution*.
- Ducounau, R. et al., 1998. *Langages et modèles à objets. État des recherches et perspectives*, Rocquencourt, France: INRIA.
- Dudek, I. & Blaise, J., 2008. Visual assessment of heritage architecture life cycles. Dans *Journal Of Universal Computer Science*. Graz, Autriche.
- Dyreson, C.E. & Snodgrass, R.T., 1998. Supporting valid-time indeterminacy. *ACM Trans. Database Syst.*, 23(1), 1-57.
- Eckert, D. & Jégou, L., 2004. Évolution récente de la population de Russie (1979-2002): cartographie interactive. *Mappemonde*, 74(2-2004).
- Eick, S.G., Nelson, M.C. & Schmidt, J.D., 1994. Graphical analysis of computer log files. *Commun. ACM*, 37(12), 50-56.
- El-Hakim, S., 2001. A flexible approach to 3D reconstruction from single images. Dans *SIGGRAPH '01 Sketches and Applications*.
- El-Hakim, S.F., Lapointe, J. & Whiting, E., 2008. Digital reconstruction and 4D presentation through time. Dans *ACM SIGGRAPH 2008 talks*. Los Angeles, California: ACM, pp. 1-1.
- Erwig, M. et al., 1999. Spatio-temporal data types: An approach to modeling and querying moving objects in database. *Geoinformatica*, 3(3), 269-296.

- Euzenat, J., 1994. *Granularité dans les représentations spatio-temporelles*, Paris: Institut National de Recherche en Informatique et en automatique.
- Evans, B.J., 1997. Dynamic display of spatial data-reliability: Does it benefit the map user? *Computers & Geosciences*, 23(4), 409-422.
- Feiner, S.K. & Beshers, C., 1990. Worlds within worlds: metaphors for exploring n-dimensional virtual worlds. Dans *Proceedings of the 3rd annual ACM SIGGRAPH symposium on User interface software and technology*. Snowbird, Utah, United States: ACM, pp. 76-83.
- Fekete, J. & Plaisant, C., 2002. Interactive Information Visualization of a Million Items. Dans *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis'02)*. IEEE Computer Society, p. 117.
- Fischer, B., 2005. Mission and recent project of the UCLA Cultural Virtual Reality Laboratory. Dans *Virtual Retrospect 2005*. Biarritz, France: Ausonius éditions, pp. 65-74.
- Francis, B. & Pritchard, J., Visualisation of historical events using Lexis pencils: Abstract.
- Frank, A., 1998. Different types of 'times' in GIS. Dans *Spatial and Temporal Reasoning in GIS*. Oxford: Egenhofer, M.J., & Golledge, R.G., pp. 40-62.
- Freeman, E. & Gelernter, D., 1996. Lifestreams: a storage model for personal data. *SIGMOD Rec.*, 25(1), 80-86.
- Galinié, H., Rodier, X. & Saligny, L., 2004. Entités fonctionnelles, entités spatiales et dynamique urbaine dans la longue durée. *Histoire & Mesure*, XIX(3/4), 223-242.
- Gallo, G., Spagnuolo, M. & Spinello, S., 2000. Fuzzy B-Splines: A Surface Model Encapsulating Uncertainty. *Graphical Models*, 62(1), 40-55.
- Garbade, R. & Dolezal, W., 2007. DMU@Airbus — Evolution of the Digital Mock-up (DMU) at Airbus to the Centre of Aircraft Development. Dans *The Future of Product Development*. pp. 3-12.
- Gershon, N., 1998. Visualization of an Imperfect World. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 18(4), 43-45.
- Golvin, J., 2003. La restitution de l'image des villes et le problème de la représentation des parties non visibles. Dans *Visual Retrospect*. Archeovision. Biarritz: Ausonius éditions, pp. 39-43.
- Gould, D.A., 2002. *Complete Maya Programming. An Extensive Guide to MEL and the C++ API* 1er éd., Morgan Kaufmann.
- Hargittai, I. & Hargittai, M., 1994. *Symmetry: A Unifying Concept*, Bolinas, Calif: Shelter Publications.
- Hascoët, M. & Beaudouin-Lafon, M., 2001. *Visualisation interactive d'information*, Paris: Laboratoire de Recherche en Informatique, UMR CNRS 8623.

-
- Havre, S. et al., 2002. ThemeRiver: Visualizing Thematic Changes in Large Document Collections. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 8(1), 9-20.
- Hearst, M.A., 1995. TileBars: Visualization of Term Distribution Information in Full Text Information Access. Dans Denver, Colorado: Irvin R. Katz, pp. 59-66.
- Hetherington, R., Farrimond, B. & Presland, S., 2006. Information rich temporal virtual models using X3D. *Computers & Graphics*, 30(2), 287-298.
- Hetherington, R.E. & Scott, J.P., 2004. Adding a fourth dimension to three dimensional virtual spaces. Dans *Proceedings of the ninth international conference on 3D Web technology*. Monterey, California: ACM, pp. 163-172.
- Jayaraman, S. & North, C., 2002. A radial focus+context visualization for multi-dimensional functions. *Visualization*, 1(1), 443-450.
- Ji-Hyun, L., Hsien-Cheng, C. & Koshak, N.A., 2005. Visualization of Spatial-Temporal Information for Historical Sites on GIS. Dans University College London, London, England: S. Batty.
- Johnson, C.R. & Sanderson, A.R., 2003. A Next Step: Visualizing Errors and Uncertainty. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 23(5), 6-10.
- Kaddouri, L., 2008. Réflexion sur la sémiologie graphique animée des flux. *Mappemonde*, 89(1-2008).
- Kapler, T. & Wright, W., 2005. Geo time information visualization. *Information Visualization*, 4(2), 136-146.
- Kavouras, M., 2001. Understanding and modelling spatial change. Dans *Life and Motion of Socio-Economic Units*. GISDATA. London: Frank A. Raper J. and Cheylan J.P., p. 348.
- Keim, D.A., 2000. Designing Pixel-Oriented Visualization Techniques: Theory and Applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 6(1), 59-78.
- Keim, D., 2001. Visual Exploration of Large Data Sets. *Communications of the ACM (CACM)*, 44(8), 38-44.
- Keim, D. & Ward, M., 2002. Visual Data Mining Techniques. Dans *Intelligent Data Analysis*.
- Keller, P.R. & Keller, M.M., 1994. *Visual Cues: Practical Data Visualization*, IEEE Computer Society Press.
- Kensek, K.M., Dodd, L.S. & N. Cipolla, 2004. Fantastic reconstructions or reconstructions of the fantastic? Tracking and presenting ambiguity, alternatives, and documentation in virtual worlds. *Automation in Construction*, 175- 186.
- Kirschenbaum, S. & Arruda, J., 1994. Effects of Graphic and Verbal Probability Information on Command Decision Making. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 36(3), 406-418.

- Koshak, N.A. & Gross, M., 1998. 3D Modeling of Historic Makkah: Strategies for Constructing Accurate CAD Models of Historic Buildings. Dans Osaka, Japan.
- Krogstie, J. & Sølvsberg, A., 1996. *Information Systems Engineering - Advanced Conceptual Modeling*, Information Systems Group, The Norwegian University of Science and Technology.
- Lamping, J., Rao, R. & Pirolli, P., 1995. A focus+context technique based on hyperbolic geometry for visualizing large hierarchies. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. Denver, Colorado, United States: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 401-408.
- Langran, G., 1992. *Time in geographic information systems*, Taylor and Francis.
- Langran, G. & Chrisman, N., 1988. A framework for temporal geographic information. *Cartographica*, 25(3), 1-14.
- Lardeur, E., Bocquet, J. & Auzet, C., 2003. Coordination des ingénieries des produits et des systèmes de production associés par l'Ingénierie Système. Dans *8ème Colloque national sur la conception mécanique intégrée et la productive*. La plagne, France: Primeca.
- Lecocq, F., 2003. Reconstitution virtuelle de Rome antique. Dans *Virtual Retrospect 2003*. Biarritz, France: Ausonius éditions, pp. 77-84. Available at: <http://www.unicaen.fr/rome>.
- Lefebvre, B., 2008. *La formation d'un tissu urbain dans la Cité de Tours : du site de l'amphithéâtre antique au quartier canonial*. Université François - Rabelais de Tours.
- Leitner, Michael & Buttenfield, Barbara P., 2000. Guidelines for the Display of Attribute Certainty. *Cartography and Geographic Information Science*, 27(1), 3-14.
- Leyton, M., 1986a. A theory of information structure. I. General principles. *J. Math. Psychol.*, 30(2), 103-160.
- Leyton, M., 1986b. A theory of information structure. II. A theory of perceptual organization. *J. Math. Psychol.*, 30(3), 257-305.
- Leyton, M., 1987. Nested structures of control: an intuitive view. *Comput. Vision Graph. Image Process.*, 37(1), 20-53.
- Leyton, M., 1992. *Symmetry, Causality, Mind*, The MIT Press.
- Liu, Y. & Zhong-xiao Hao, 2005. Petri Net Based Spatio-temporal Relationships for Moving Objects. *Journal of Computer Science*, 1(4), 510-514.
- Losier, Pouliot, J. & Fortin, 2007. 3D geometrical modeling of archeological excavations at Tell'Acharneh (Syria). *Journal of Archeological Science*, 34(2), 272-288.
- Lynch, K., 1960. *The Image of the City* MIT Press., Cambridge MA.

- MacEachren, A.M. et al., 2005. Visualizing Geospatial Information Uncertainty: What We Know and What We Need to Know. *Cartography and Geographic Information Science*, 32(3), 139-160.
- Mackinlay, J.D., Robertson, G.G. & Card, S.K., 1991. The perspective wall: detail and context smoothly integrated. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Reaching through technology*. New Orleans, Louisiana, United States: ACM, pp. 173-176.
- Matthews, G. & Roze, M., 1997. Worm Plots. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 17(6), 17-20.
- McBrien, P., Seltveit, A.H. & Wangler, B., 1992. An Entity-Relationship Model Extended to Describe Historical Information. Dans *International Conference on Information Systems and Management of Data (CISMOD 92), Bangalore, India*. pp. 244-260.
- Michon, J., 1993. Concerning the time sense: the seven pillars of time psychology. *Psychologica belgica*, 33(2), 329-345.
- Mihalisin, T., Timlin, J. & Schwegler, J., 1991. Visualizing Multivariate Functions, Data, and Distributions. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 11(3), 28-35.
- Moere, A.V., 2004. Time-Varying Data Visualization Using Information Flocking Boids. Dans *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization*. IEEE Computer Society, pp. 97-104.
- Müller, W. & Schumann, H., 2003. Visualization methods for time-dependent data - an overview. Dans *Winter Simulation Conference*. New Orleans, USA: S. Chick, P. J. Sánchez, D. Ferrin, and D. J. Morrice.
- Myers, D.G., 2000. *Psychology (6th edition)*, Worth Publishing.
- Palladio, A., 1992. *I Quattro Libri dell'Architettura* Edizioni Studio Tesi., Pordenone.
- Pang, A.T., Wittenbrink, C.M. & Lodh, S.K., 1997. Approaches to Uncertainty Visualization. *The Visual Computer*, 13(8), 370-390.
- Parent, C., Spaccapietra, S. & Zimanyi, E., 1999. Spatio-temporal conceptual models: data structures + space + time. Dans *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Advances in geographic information systems*. Kansas City, Missouri, United States: ACM, pp. 26-33.
- Pelekis, N. et al., 2004. Literature review of spatio-temporal database models. *Knowl. Eng. Rev.*, 19(3), 235-274.
- Perrault, C., 1684. *Les dix livres d'architecture de Vitruve*, Pierre Mardaga.
- Peuquet, D. & Duan, N., 1995. An Event-Based Spatio-temporal Data Model (ESTDM) for Temporal Analysis of Geographical Data. *Journal of Geographical Information Systems*, 9(1), 7-24.
- Peuquet, D. & Wentz, E., 1994. An approach for Time-Based Spatial Analysis of Spatio-Temporal Data. Dans *Proceedings*. pp. 489-504.

- Peuquet, D., 1994. It's about time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. Dans *Annals of the Association of American Geographers*. Cambridge, pp. 441-461.
- Plaisant, C. et al., 1996. LifeLines: visualizing personal histories. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: common ground*. Vancouver, British Columbia, Canada: ACM, pp. 221-227.
- Reinders, F., Post, F. & Spoelder, H., 2001. Visualization of time-dependent data with feature tracking and event detection. *The Visual Computer*, 17(1), 55-71.
- Renolen, A., 1999. *Concepts and methods for modelling temporal and spatio-temporal information*. Norwegian University of Science and Technology, NTNU.
- Renolen, A., 1997a. Conceptual Modelling and Spatiotemporal Information Systems: How to Model the Real World. *ScanGIS'97*, (June 1-3), 1-22.
- Renolen, A., 1997b. *Modelling Spatiotemporal Information: The Spatiotemporal Object Model*, Department of Surveying and Mapping (IKO), The Norwegian Institute of Technology,
- Renolen, A., 1997c. *Temporal Maps and Temporal Geographical Information Systems*, Trondheim, NORWAY.
- Robertson, G.G. & Mackinlay, J.D., 1993. The document lens. Dans *Proceedings of the 6th annual ACM symposium on User interface software and technology*. Atlanta, Georgia, United States: ACM, pp. 101-108.
- Rodier, X. & Saligny, L., 2007. Modélisation des objets urbains pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée. Dans *SAGEO*.
- Rojas-Vega, E. & Kemp, Z., 1995. An Object-Oriented Data Model for Spatio-Temporal Data. Dans *Ninth Annual Symposium on Geographic Information Systems*. Vancouver, Canada.
- Saint-Aubin, J., 2000. *Le Relevé Et La Représentation De L'architecture* Hardcover., Inventaire general des monuments et des richesses artistiques de la France.
- SanJosé-Alonso, J. et al., 2009. Information and knowledge systems for integrated models in Cultural Heritage. Dans *Proceedings of the 3rd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2009*. Trento, Italy: F. Remondino, S. El-Hakim, L. Gonzo.
- Saraiya, P., Lee, P. & North, C., 2005. Visualization of Graphs with Associated Timeseries Data. Dans *Proceedings of the Proceedings of the 2005 IEEE Symposium on Information Visualization*. IEEE Computer Society, p. 30.
- Schindler, G., Dellaert, F. & Kang, S., 2007. Inferring Temporal Order of Images From 3D Structure. Dans *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- Schlicht, M., 2006. Interpénétration des volumes architecturaux et complexité visuelle dans l'architecture française de la fin du Moyen Âge. Le pilier de l'avant-portail du bras nord du transept de la cathédrale de Rouen.

-
- Schlicht, M., 2008. L'analyse en trois dimensions: applications possibles à l'architecture médiévale.
- Serrato-Combe, A., 2001. From Aztec pictograms to digital media. Dans *Reinventing the Discourse. How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture*. Syracuse: W. Jabi, pp. 34–43.
- Shneiderman, B., 1996. The eyes have it: a task by data type taxonomy for information visualizations. Dans *Visual Languages, 1996*. pp. 336--343.
- Shubert, H., 2008. Preserving digital archives at the canadian centre for architecture: Greg Lynn's embryological house. Dans *Architecture et archives numériques. L'architecture à l'ère du numérique : un enjeu de mémoire*,
- Sideris, A. & Roussou, M., 2002. Making a New World Out of an Old One: In search of a common language for archaeological immersive VR representation. Dans pp. 31-42.
- Snyder, A. & Paley, S., 2001. Experiencing and ancient Assyrian palace: methods for a reconstruction. Dans *Reinventing the Discourse. How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture*. Syracuse: W. Jabi, pp. 62–75.
- Spallone, R., 2005. Preserving the architectural heritage by increasing the knowledge of the community: the case of the ancient church of San Pietro di Consavia in Asti. Dans *XX CIPA International Symposium*. Torino, pp. 958-962.
- Stefani, C., 2006. Modélisation spatio-temporelle d'édifices patrimoniaux. Proposition d'une approche pour la prise en compte de la dimension temporelle dans l'analyse de la cour d'Honneur de la Sorbonne à Paris. *MIA Journal*, 0(2), 101-106.
- Stefani, C. et al., 2010. Modeling building historical evolutions. Dans *Proceedings of Focus K3D conference on Semantic 3D Media and Content*. Sophia Antipolis.
- Stefani, C. et al., 2008. Reasoning about space-time changes: an approach for modeling the temporal dimension in architectural heritage. Dans *Proceedings of the IADIS International Conference*. Amsterdam.
- Stefani, C. et al., 2010. Time indeterminacy and spatio-temporal building transformations: an approach for architectural heritage understanding. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 4(1), 61-74.
- Stojakovic, V. & Tepavcevic, B., 2009. Optimal methods for 3d modeling of devastated architectural objects. Dans *Proceedings of the 3rd ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2009*. Trento: F. Remondino, S. El-Hakim, L. Gonzo.
- Strothotte, T., Masuch, M. & Isenberg, T., 1999. Visualizing Knowledge about Virtual Reconstructions of Ancient Architecture. Dans *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics*. IEEE Computer Society, p. 36.
- Sun, G., 2007. A digital mock-up visualization system capable of processing giga-scale CAD models. *Computer Aided Design*, 39(2), 133-141.

- Tekusova, T. & Schreck, T., 2008. Visualizing Time-Dependent Data in Multivariate Hierarchic Plots - Design and Evaluation of an Economic Application. Dans *Proceedings of the 2008 12th International Conference Information Visualisation*. IEEE Computer Society, pp. 143-150.
- Thomson, J. et al., 2005. A typology for visualizing uncertainty. Dans *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. pp. 146-157.
- Thueux, M., 2009. *Génération de graphes dynamiques à partir d'une base de données spatio-temporelle*, Aix-en-Provence: I.U.T. d'Aix-en-Provence.
- Tominski, C., Schulze-Wollgast, P. & Schumann, H., 2005. 3D Information Visualization for Time Dependent Data on Maps. Dans *Information Visualisation*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, pp. 175-181.
- Tominski, C., Abello, J. & Schumann, H., 2004. Axes-based visualizations with radial layouts. Dans *Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing*. Nicosia, Cyprus: ACM, pp. 1242-1247.
- Tryfona, N., 1998. Modeling Phenomena in Spatiotemporal Databases: Desiderata and Solutions. Dans *Proceedings of the 9th International Conference on Database and Expert Systems Applications*. Springer-Verlag, pp. 155-165.
- Tryfona, N. & Jensen, C.S., 1999. Conceptual Data Modeling for Spatiotemporal Applications. *Geoinformatica*, 3(3), 245-268.
- Tsai, R., 1986. An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. Dans *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami Beach, FL, pp. 364-374.
- Tufte, E.R., 2001. *The Visual Display of Quantitative Information* Graphics Press., Cheshire, CT.
- Tversky, B. & Morrison, J.B., 2002. Animation: can it facilitate? *International Journal of Human-Computer Studies*, 57(4), 247--262.
- Vergauwen, M. et al., 2004. As Time Flies By: Mixed Image and Model-Based Rendering. Dans *Vast*. Brussels, Belgium: Eurographics Association, pp. 241-250.
- Viégas, F.B. et al., 2007. Many Eyes: A Site for Visualization at Internet Scale. Dans *InfoVis 2007*. 6. Research Triangle Park, NC, USA: IEEE Computer Society, pp. 1121-1128.
- Wachowicz, M. & Healey, C.G., 1994. Towards Temporality in GIS. Dans *Innovations in GIS*. Worboys M. F.
- Wang, S. & Liu, D., 2004. Spatial Query Preprocessing in Distributed GIS. Dans *GCC. Lecture Notes in Computer Science*. Wuhan, China: H. Jin, Y. Pan, N.Xiao and J.Sun, pp. 737-744. Available at: <http://dblp.uni-trier.de>.
- Wattenberg, M., 2002. Arc Diagrams: Visualizing Structure in Strings. Dans *INFOVIS*. Boston, Massachusetts: IEEE Computer Society, pp. 110-116.

-
- Weber, C. & Gançarski, P., 2007. *Revue Internationale de Géomatique. European Journal of GIS and Spatial Analysis*,
- Weber, M., Alexa, M. & Müller, W., 2001. Visualizing Time-Series on Spirals. Dans *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization 2001 (INFOVIS'01)*. IEEE Computer Society, p. 7.
- Wijk, J.J.V. & Selow, E.R.V., 1999. Cluster and Calendar Based Visualization of Time Series Data. Dans *Proceedings of the 1999 IEEE Symposium on Information Visualization*. IEEE Computer Society, p. 4.
- Wijk, J.J.V. & Liere, R.V., 1993. HyperSlice: visualization of scalar functions of many variables. Dans *Proceedings of the 4th conference on Visualization '93*. San Jose, California: IEEE Computer Society, pp. 119-125.
- Wijk, J.J.V., 2002. Image based flow visualization. Dans *Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. San Antonio, Texas: ACM, pp. 745-754.
- Wong, P.C. & Bergeron, R.D., 1997. 30 Years of Multidimensional Multivariate Visualization. Dans *Scientific Visualization, Overviews, Methodologies, and Techniques*. IEEE Computer Society, pp. 3-33.
- Worboys, M., Hearshshow, H. & Maguire, D., 1990. Object-Oriented Modeling for Spatial Databases. *Int. Journal of GIS*, 4(4).
- Yin, Z., 2005. A Multi-Scale GIS Database Model Based On Petri Net. Dans *Service and Application of Spatial Data Infrastructure*. Hangzhou, China: School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, pp. 271-276.
- Yuan, M., 1996. Modeling Semantical, Temporal, and Spatial Information in Geographic information Systems. Dans *Geographic Information Research : Bridging the Atlantic*. Taylor & Francis, pp. 334-347.
- Zuk, T.D. et al., 2005. Visualizing Temporal Uncertainty in 3D Virtual Reconstructions. Dans *Eurographics/IEEE VGTC Symposium on Visualization (EuroVis 2007)*. Eurographics Association. M. Mudge, N. Ryan, R. Scopigno, pp. 99-106.

Table des illustrations

<i>Figure 1. Synthèse des sources documentaires graphiques permettant de documenter un site historique. Les traits pointillés mettent en relation les sources bidimensionnelles à partir desquelles un modèle 3D peut être reconstitué. Inversement, les traits jaunes continus indiquent les sources graphiques bidimensionnelles qui peuvent être produites à partir d'un modèle 3D.</i>	17
<i>Figure 2. Rapport entre les sources et les incertitudes : évaluation de la qualité des informations offertes par les sources.</i>	19
<i>Figure 3. Divers types d'incertitude (spatiale et temporelle) résumant la classification de Thomson et appliqués à l'architecture historique.</i>	20
<i>Figure 4. Andrea Palladio, Thermes d' Agrippa et Panthéon, RIBA, Londres, Vol. VII, fol. 2.</i>	23
<i>Figure 5. A gauche, vestiges du temple de Mars Ultor à Rome; à droite, restitution tridimensionnelle du même temple. Arkaya, 2005.</i>	24
<i>Figure 6. A gauche, photo du temple de Vespasien dans le forum romain, à droite, restitution 3D du même temple (Cariou 2005).</i>	25
<i>Figure 7. Reconstructions 3D à partir de peintures et photos anciennes (El-Hakim 2001).</i>	26
<i>Figure 8. Etapes historiques de restitution de l'église de San Pietro, Asti, sur 800 ans : du XIIe siècle jusqu'au 1930, (Spallone 2005).</i>	27
<i>Figure 9. Images correspondantes à trois états historiques selon deux angles de vues différents.</i>	27
<i>Figure 10. 4D cities : à gauche, classification des correspondances dans une matrice de visibilité ; à droite, structuration de la maquette spatio-temporelle en fonction du temps.</i>	28
<i>Figure 11. Restitution tridimensionnelle hybride d'opacité et de tonalité (Kensek et al. 2004).</i>	29
<i>Figure 12. a) L. Da Vinci. Etude de proportions sur le corps humain ; b) Symétrie dans la géométrie des mosaïques murales de l'Alhambra, Grenade, Espagne ; c) Villa Capra dite la Rotonda, Vicenza, Italie. A. Palladio, 1566 – 1571, I Quattro libri dell'architettura (Venise, 1601) Collection RIBA, Londres; d) Maison dansante à Prague, Frank Gehry.</i>	35
<i>Figure 13. STOM (Spatio-Temporal Object Model). Dans (Renolen 1997b).</i>	41
<i>Figure 14 a) Les types de comportements des Objets Temporels. Dans (Renolen 1997a) ; b) Les sept types basiques de changements.</i>	42
<i>Figure 15. Relation entre les éléments. (Y. Liu & Zhong-xiao Hao 2005).</i>	43
<i>Figure 16. Représentation des états, des événements à échelles multiples et de leurs relations au travers des Réseaux de Pétri. Dans (Yin 2005).</i>	44
<i>Figure 17. Modèles de représentation à échelles multiples. Représentation d'une carte géographique selon : des instances (a), des hiérarchies (b), les structures de Petri (c), et du cycle de vie (d). Dans (Yin 2005).</i>	45

Figure 18. a) Les blocs de construction dans l'EIA 632. b) La correspondance système / projet dans l'ISO 15 288. Dans (Lardeur et al. 2003).	45
Figure 19. A gauche, représentation des liens entre les systèmes des arborescences de développement sans notion temporelle. A droite, représentation des contraintes de planification avec notion temporelle chez Ford. Dans (Lardeur et al. 2003).	46
Figure 20. Représentation des typologies de transformations en patrimoine historique.	53
Figure 21. Représentation des changements de fonction, d'identité et de propriété en patrimoine historique.	54
Figure 22. Types de changements : instantanés et graduels (de durées différentes).	54
Figure 23. Description des transformations concernant certains édifices à Carcassonne à travers la notation graphique de Renolen. Les rectangles arrondis représentent les durées des transformations ; les relations entre rectangles représentent les types de transformations.	55
Figure 24. Différentes résolutions spatiales à Carcassonne : a) représentation des différentes parties d'un édifice ; b) représentation de chaque édifice ; c) représentation de groupes d'édifices.	56
Figure 25. Diminution progressive de la granularité temporelle appliquée à deux édifices à Carcassonne : a) représentation de toutes les transitions ; b) simplification des transitions ; c) simplification ultérieure des transitions : l'union et la division de deux édifices sont représentés par une réaffectation.	57
Figure 26. Application des graphes historiques à la Cour d'Honneur de la Sorbonne, Paris. La représentation de l'ensemble architectural permet de décrire les trois grandes étapes qui se sont déroulées.	58
Figure 27. Façade sud de la Cour de Midi dans le Château Comtal de Carcassonne. Diverses stratifications temporelles sont lisibles sur l'orthophoto de la façade.	59
Figure 28. Hiérarchie de graphes de relation (De Luca 2006).	60
Figure 29. Les deux restitutions hypothétiques de Guyonnet et Gardel pour deux logements/tours à Carcassonne. Schéma des graphes de relations qui se croisent entre les éléments.	61
Figure 30. Entités temporelles dans le cas, à gauche, de la Sorbonne (macro-transformations) ; à droite, de Carcassonne (micro-variations).	62
Figure 31. Schéma général de l'approche proposée.	64
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.	70
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.	71
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.	72
Figure 35. Référencement spatial des photos historiques du Trophée des Alpes sur le modèle 3D de l'état actuel de l'édifice.	73
Figure 36. Insertion d'images en projection orthogonale dans la scène 3D.	74
Figure 37. Référencement spatial de pseudo perspectives en fonction de divers objets de la scène représentée.	74
Figure 38. Application de textures à partir d'une photo historique du Trophée des Alpes.	76
Figure 39. Application de textures à partir d'une photo redressée du Trophée des Alpes.	77
Figure 40. Application de textures à partir d'un dessin en pseudo perspective de la forteresse (ancien Trophée des Alpes).	77
Figure 41. Comparaison des reconstructions des états historiques en fonction des sources utilisées.	78

Figure 42. Découpage morphologique de la colonnade du Trophée des Alpes en fonction de la nature de l'analyse.....	80
Figure 43. Associations des graphes à une certaine époque temporelle en fonction de la structuration hiérarchique choisie.....	81
Figure 44. Fragment de code pour le référencement de l'iconographie.....	82
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 référenciée.....	83
Figure 46. Fragment de code Mel concernant les attributs de création et de démolition des entités.....	84
Figure 47. Qualification des transformations à travers les groupes. Les groupes deviennent les noyaux autour desquels l'historique d'un édifice est sauvegardé.....	85
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.....	86
Figure 49. Qualification des entités par des attributs temporels, spatiaux et de certitude.....	88
Figure 50. Gestion des projets : la structure des dossiers.....	89
Figure 51. Insertion des nouvelles entités (en rouge) suite à la nouvelle découverte d'une étape temporelle.....	90
Figure 52. Interface d'un éditeur vidéo.....	95
Figure 53. Evolution démographique en Russie. La sélection de différents items est faite par une carte dynamique SVG (Eckert & Jégou 2004).....	96
Figure 54. Projet GeoTime. Les trajets verts représentent les mouvements d'une entité exprimés par rapport aux coordonnées géographiques et temporelles (Kapler & Wright 2005).....	97
Figure 55. Dispositif Infosphere pour le tri et la visualisation d'informations spatiales, temporelles et documentaires.....	97
Figure 56. Exemple de quelques tables de la base de données Entités-Relations-Temps du système de consultation sur le web.....	103
Figure 57. Architecture du système Nubes Tempus. Le site PHP, la scène 3D et l'interface en SVG pour la gestion des graphes dialoguent entre eux à travers des scripts java, PHP, SVG et les requêtes SQL.....	104
Figure 58. Schéma de fonctionnement de l'outil de formulation de requêtes temporelles.....	106
Figure 59. Schéma de fonctionnement de l'outil pour la sélection d'états historiques à partir de la barre temporelle.....	107
Figure 60. Représentation spatio-temporelle des transformations des édifices: en haut, représentations 3D et graphes sémantiques; en bas, notation des graphes historiques.....	109
Figure 61. Schéma de fonctionnement de la sélection et de la consultation de l'historique à partir de la sélection de la géométrie.....	110
Figure 62. Schéma de fonctionnement de la sélection et de la consultation de la géométrie à partir de la sélection des graphes historiques.....	110
Figure 63. Schéma de fonctionnement de l'outil de visualisation et isolement d'entités appartenant à divers états temporels.....	112
Figure 64. Schéma de fonctionnement de l'outil pour visualiser, isoler et comparer les hypothèses.....	114
Figure 65. a) Visualisation d'édifices sélectionnés à travers des requêtes temporelles ; b) Visualisation des évolutions de deux édifices à Carcassonne par un code de couleurs : les éléments géométriques plus anciens sont représentés en rouge, les parties plus récentes en jaune ; c) Superposition des hypothèses de Guyonnet et Gardel visualisées à travers des transparences ; d) Visualisation de l'hypothèse de Guyonnet : les édifices existants sur le site de Carcassonne à une certaine époque selon Guyonnet et Gardel sont visualisés en rouge ; e) Visualisation des états incertains de construction et de démolition à l'aide de transparences ; f) Visualisation des volumes hypothétiques incertains dans l'hypothèse de Gardel.....	115
Figure 66. Représentation de l'incertitude temporelle par le biais de graphes historiques.....	117
Figure 67. Recherche de sources iconographiques à partir d'entités.....	122

Figure 68. Comparaison de divers états temporels à partir d'une maquette 3D et d'une source iconographique. 123

Figure 69. Le Cloître de l'Abbaye de Saint-Guilhem-le-Désert. Restitution 3D de l'état actuel et reconstitution hypothétique du cloître au XIIe siècle. 124

Figure 70. Anastylose virtuelle des fragments du cloître de Saint Guilhem le Désert. 125

Figure 71. Exemple de spatialisation de l'incertitude sur le mobilier de la Chartreuse à Villeneuve-lès-Avignon (Gard). Le tableau rassemble les éléments de mobilier et de décor de l'église conventuelle, associés à leurs références documentaires. Images d'Aurélie Favre-Brun. 126

Figure 72. Représentation des vestiges de la Chapelle de R. De Sorbon à Paris. La première correspond à la restitution sur la base d'un plan historique du XVIe siècle ; la deuxième est effectuée sur la base de la découverte des fondations pendant la reconstruction des édifices de la Cours de la Sorbonne en 1896. 127

Figure 73. Reconstruction du processus de conception numérique de l'Embryological House de l'architecte Greg Lynn. 128

ANNEXE A

Panorama étendu des transformations

Les transformations dans le domaine patrimonial sont nombreuses. Deux réflexions sont à la base de cet annexe. D'une part, elles sont encore plus nombreuses si la distinction est faite entre l'échelle patrimoniale, archéologique et urbaine. De ce fait, les transformations sont détaillées prenant en compte les diverses échelles d'analyse. D'autre part, quand les transformations concernent des groupes d'entités, différents types de modifications sont possibles et certaines concernent plus d'une catégorie à la fois. A titre d'exemple, le cas d'union peut comporter la dissolution d'un ensemble d'entités pour regrouper les membres dans un autre ensemble. Certains des changements typiques sont énumérés ci-dessous. Suite au recensement des transformations de base, sont décrites les typologies de transformation plus complexes, qui seront accompagnées par un exemple appliqué au domaine patrimonial.

Création - Un objet est créé et il lui est attribué la valeur x .

$\vdash a:x$

Variation - Un objet a changé de la valeur x à la valeur y .

$\alpha:(x \rightarrow y)$

Destruction - Un objet a été détruit.

$\neg a$

Réincarnation - Un objet qui avant a été détruit, est recréé.

$\alpha:(L \rightarrow x)$

Métamorphose - Un objet change de type et apparaît avec la nouvelle identité et (éventuellement) une nouvelle valeur.

$\neg a:x \rightarrow \vdash b:y$

Agrégation - Un nombre arbitraire d'objets sont rassemblés pour former un nouvel ensemble. Exemple : les éléments lapidaires éparpillés d'un cloître sont rassemblés pour former l'ensemble lapidaire du musée.

$\alpha + b + c \rightarrow \vdash A:\{a, b, c\}$

Dissolution - Un groupe est détruit, mais les membres ne le sont pas. Exemple : une arcade est détruite mais les éléments existent toujours.

$\neg A:\{a, b, c\} \rightarrow \alpha + b + c$

Inclusion - Un nouveau membre est inclus dans un groupe préexistant. Exemple : des éléments lapidaires sont rajoutés à la collection muséale existante.

$\alpha + A:\{b, c\} \rightarrow A:\{a, b, c\}$

Scission - Un membre se sépare de l'ensemble. Exemple : le mobilier de Versailles est éparpillé en plusieurs musées, ou un ensemble non classé de pierres sont finalement divisées en plusieurs sous-groupes selon leur fonction.

$$A: \{a, b, c\} \rightarrow a + A: \{b, c\}$$

Vide - Tous les membres d'un groupe sortent de l'ensemble mais le groupe n'est pas détruit. Exemple : les éléments lapidaires estimés comme appartenant certainement à un artefact sont identifiés comme appartenant à un autre artefact ; l'ensemble d'éléments du premier artefact est vide tant que des nouvelles hypothèses ne sont pas formulées.

$$A: (\{a, b, c\} \rightarrow \emptyset)$$

Division - Un groupe est détruit, et les membres de la forme ancienne forment un ou plusieurs nouveaux ensembles. Exemple : un monument est utilisé comme carrière pendant des siècles : ses éléments sont englobés dans les maisons limitrophes.

$$\neg A: \{a, b, c, d\} \rightarrow \neg B: \{a, b\} + C: \{c, d\}$$

Union - Deux ou plusieurs groupes sont détruits, et les membres des anciens ensembles forment une nouvelle série. Exemple : deux édifices sont annexés pour former un seul nouveau artefact.

$$\neg A: \{a, b\} + \neg B: \{c, d\} \rightarrow \neg C: \{a, b, c, d\}$$

Déduction - Un sous-ensemble d'un ensemble fait sécession d'un ensemble et forme un nouveau groupe. Exemple : une partie de l'édifice devient indépendant. Un étage d'un monument est déduit pour devenir un musée.

$$A: \{a, b, c, d\} \rightarrow A: \{a, b\} + \neg B: \{c, d\}$$

Annexion - Un groupe est détruit, et les membres sont inclus dans un autre ensemble. Exemple : Un édifice est annexé à un autre préexistant et il va l'agrandir.

$$A: \{a, b\} + \neg B: \{c, d\} \rightarrow A: \{a, b, c, d\}$$

Déplacement - Les membres d'un ensemble se séparent de cet ensemble et deviennent membres d'un autre ensemble ayant une position différente. Exemple : une partie du cloître est démontée et reconstruite ailleurs.

$$A: \{a, b, c\} + B: \{d, e\} \rightarrow A: \{a, b\} + B: \{c, d, e\}$$

Duplication - Un objet a été dupliqué. Exemple : des bustes sont scannés et reproduits à travers des techniques de prototypage rapide.

$$a: x \rightarrow \neg b: x + a: x$$

Imitation - Certains membres d'un ensemble forment une nouvelle série, sans se séparer de leur appartenance à l'ancien ensemble. Exemple : des bustes grecques sont copiés pendant la période de la Renaissance.

$$A: \{a, b, c\} \rightarrow \neg B: \{a, b\} + A: \{a, b, c\}$$

ANNEXE B

Notions de base de modélisation spatio-temporelle

La sémantique de base en modélisation spatio-temporelle concerne les concepts d'espace, du temps, et d'espace-temps.

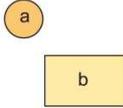
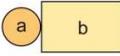
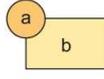
La *dimension spatiale* est définie par les éléments suivants.

Structure de l'espace. L'espace peut être défini comme raster ou vectoriel. Dans le modèle *raster* l'espace est structuré comme une grille des cellules (*pixels* pour la représentation 2D ou *voxels* pour la représentation 3D). En revanche, dans le modèle *vectoriel*, l'objet spatial est décrit à travers les points de début et de fin.

Orientation/direction/mesure. Ces termes décrivent les objets réels dans l'espace qu'ils occupent et par rapport aux valeurs de mesure et/ou aux opérations comparatives.

Granularité spatiale. Ce terme désigne la taille la plus petite du système spatial.

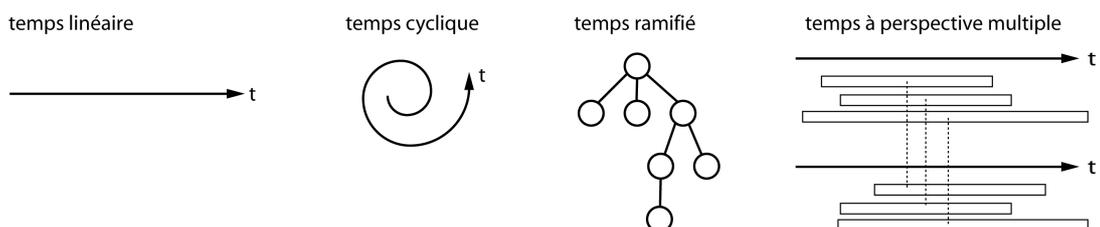
Topologie spatiale. Les critères pour décrire les relations spatiales entre des objets réels sont nombreux. Il s'agit de classifications des positions réciproques entre objets.

relation a r b	égale	disjoint	connecté extérieurement	partiellement superposé	connecté	couvre	à l'intérieur
a / b							
réciproque b r a						est couvert	contient

La *sémantique temporelle* est définie par les éléments :

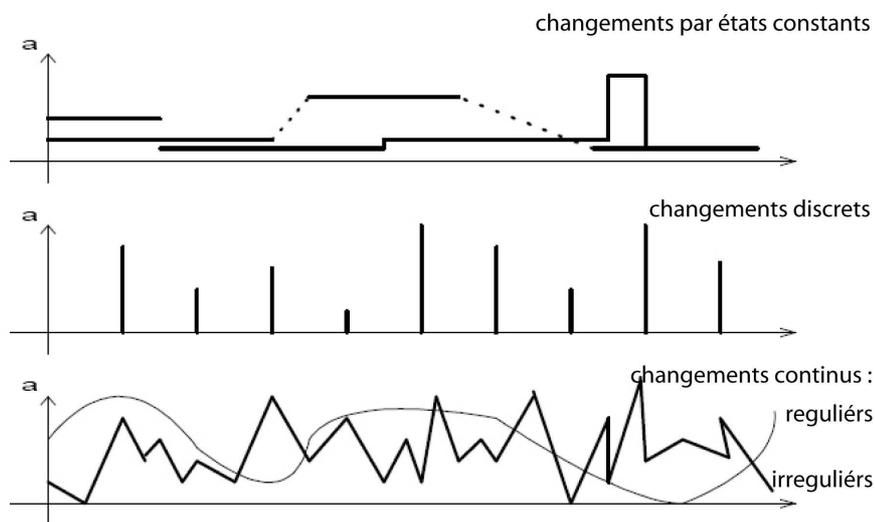
Granularité temporelle. Elle est spécifiée par un point sur l'axe du temps et par une longueur qui décrit la taille de chaque graine.

Ordre du temps. La perspective temporelle peut être décrite selon deux critères (Frank 1998). Le *temps linéaire* assume un point initial et définit un axe de temps linéaire contenant des données du passé au futur. Le *temps cyclique*, illustré par un axe cyclique, représente des points dont l'ordre n'est pas significatif par rapport au cycle temporel. Le temps *ramifié* est utilisé pour des scénarios où plusieurs alternatives sont possibles. Enfin, le temps à *perspective multiple* permet de spécifier, pour chaque état temporel, plusieurs éléments qui résultent d'événements parallèles au fil du temps.



Densité du temps. Le temps peut être modélisé comme élément discret³² (à nombre entier) ou continu (à nombre réel). La densité du temps est liée aux types de changement et aux événements. Les changements sont multiples : si les changements sont soudains, l'axe temporel représente des valeurs à pas constantes ; en revanche, si les changements sont continus, ils se distinguent en deux catégories : les changements uniformes (par exemple des trajectoires uniformes d'avions ou bateaux) ou irréguliers (par exemple les trajectoires irrégulières des taxis dans la ville). De plus, certains événements permettent de représenter des valeurs discrètes, qui sont collectées périodiquement ou irrégulièrement (comme un tremblement de terre). Enfin, certaines entités sont statiques et inaltérables, tandis que d'autres peuvent dépendre du temps (Frank 1998).

TYPES DE CHANGEMENTS EN FONCTION DE LA DENSITE DU TEMPS

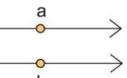
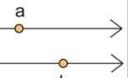


Temps de transaction et de validation. Deux aspects différents associent l'espace et le temps. Le *temps de transaction* est le moment auquel un événement est enregistré dans la base de données. Le *temps de validation* est le temps auquel un événement a eu lieu.

Durée de vie. Ce facteur montre si un modèle gère la durée d'un événement et s'il garde la trace de l'historique.

Topologie temporelle. Les critères pour décrire les relations temporelles entre des événements se basent sur la comparaison entre points et intervalles (Allen 1984; Erwig et al. 1999; Euzenat 1994). Les relations topologiques temporelles sont nombreuses et elles sont décrites dans la figure suivante.

³² Le temps réel peut être pensé comme divisé en un ensemble d'intervalles définis d'instant significatifs pour évaluer les variables en sortie.

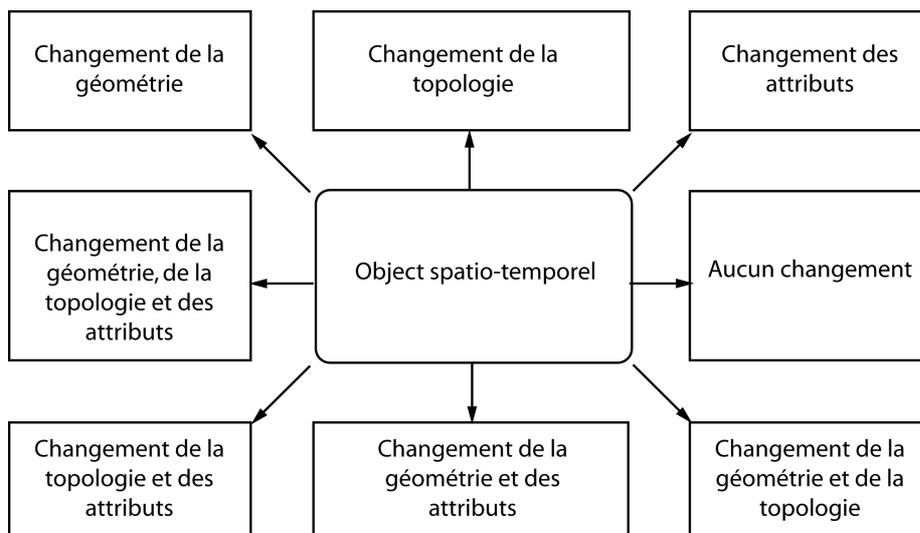
relation a r b	égale	avant
a / b		
réciproque b r a		après

relation a r b	égale	avant	pendant	commence avant et termine avant	commence et termine avant	termine et commence après	termine au début
a / b							
réciproque b r a		après	englobe	finit après et commence après	est commencé par et termine après	est terminé par et commence avant	commence à la fin

La *sémantique spatio-temporelle* est définie par les éléments :

Types de données. Les données sont spatiales (points / lignes / régions), temporelles (intervalles), et spatio-temporelles (régions et points en mouvement).

Type de changement. Le changement est décrit en forme et en taille et il peut créer 8 différents scénarios : un changement de géométrie ou de topologie ou des attributs, mais aussi de deux ou trois de ces aspects en même temps et enfin aucun changement.



Évolution dans l'espace et dans le temps. Ce critère indique le mouvement ou changement des objets dans l'espace, mais aussi permet de calculer la vitesse ou l'accélération des objets.

Topologie spatio-temporelle. Ce critère permet d'estimer la distance, la direction et le changement de taille d'un objet. De plus, il évalue la capacité des modèles de représenter les relations topologiques et l'évolution des objets spatiaux dans le temps.

Dimensionnalité. Ce critère permet d'évaluer si les modèles supportent 2, 2.5, 3 dimensions ou plus.

ANNEXE C

Comparaison des modèles spatio-temporels

Sémantique temporelle					
Modèles de données s-t	Notion de temps	Densité du temps	Durée	Ordre du temps	Arborescence
Snapshot Model	Modélis. : enregist. par couches successives Temps : attribut de position / repère absolue	Modélisation discrète	No	Linéaire	No
STC	Modélis. : enregist. par couches successives Temps : intégré aux entités spatiales/repère relative	Modélisation discrète	No	Linéaire	No
Simple Time Stamping	Modélis. : enregistrements d'états de l'objet Temps : attribut de l'objet / repère absolue	Modélisation discrète	No	Linéaire	No
Event-Oriented	Modélis. : enregistrements d'états de l'événement Temps : attribut de l'événement / repère relative	Modélisation discrète	No	Linéaire	No
3 Domain	Modélis. : enregistrements d'états temporelles Temps : objet indépendant / repère absolue-relative	Modélisation discrète	No	Linéaire	No
History Graph	Modélis. : enregistrements d'événements/processus Temps : attribut de l'objet / repère absolue - relative	Mod. discrète /continue	Oui	Linéaire	No
STER	Modélis. : enregistrements d'états de changement Temps : attribut de l'entité -relations/repère absolue	Modélisation discrète	No	Linéaire	No
O-R	Modélis. : enregistrements d'états de phénomènes Temps : attribut de l'objet / repère absolue - relative	Mod. discrète /continue	No	Linéaire	No
O-O	Modélis. : enregistrements d'états de l'objet Temps : attribut de l'objet / repère absolue - relative	Mod. discrète /continue	No	Linéaire	No
Moving Object	Modélis. : enregistrements d'états de fonctions Temps : intégré aux entités spatiales/repère absolue	Mod. discrète /continue	Oui	Linéaire	No
Multi scale DB	Modélis. : enregistrements d'événements / relations Temps : attribut de l'espace /repère absolue -relative	Mod. discrète /continue	No	Linéaire	Oui
Modèle processus	Modélis. : enregistrements d'événements/processus Temps : attribut de l'objet / repère absolue - relative	Mod. discrète /continue	No	A arbre	Oui

Sémantique spatiale					
Modèles de données spatio-temporelles	Structure d'espace	Orientatation / direction	Relations topologiques	Échelle de restitution	Structure d'espace
Snapshot Model	Raster	No	No	No	Raster
STC	Vectorielle	No	No	No	Vectorielle
Simple Time Stamping	Vectorielle	No	No	No	Vectorielle
Event-Oriented	Vectorielle/raster	No	Oui	No	Vectorielle/raster
3 Domain	Vectorielle	No	Oui	No	Vectorielle
History Graph	Vectorielle	No	No	No	Vectorielle
STER	Vectorielle	No	No	No	Vectorielle
O-R	Vectorielle	No	Oui	No	Vectorielle
O-O	Vectorielle/raster	Oui	Oui	No	Vectorielle/raster
Moving Object	Vectorielle/raster	Oui	Oui	No	Vectorielle/raster
Multi scale DB	Vectorielle/raster	Oui	No	Oui	Vectorielle/raster
Modèle processus	Vectorielle	Oui	No	No	Vectorielle

Formulation des requêtes											
Modèles de données s-t	Spatiales					Temporelles			Spatio-temporelles		
	Attribut	Point	Distance	Voisin plus proche	Topologique	Élémentaire	Gamme	Relations	Élémentaire	Gamme	Comportements
Snapshot Model	Oui	No	No	No	No	Oui	No	No	No	No	No
STC	Oui	Oui	No	No	No	Oui	No	No	Oui	No	No
Simple Time Stamping	Oui	Oui	No	No	No	Oui	Oui	No	Oui	No	No
Event-Oriented	Oui	Oui	No	No	Oui	Oui	Oui	No	Oui	No	No
3 Domain	Oui	Oui	No	No	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	No	No
History Graph	Oui	Oui	No	No	No	Oui	Oui	Oui	Oui	No	No
STER	Oui	Oui	Oui	No	No	Oui	Oui	No	Oui	No	No
O-R	Oui	Oui	Oui	No	Oui	Oui	Oui	No	Oui	No	No
O-O	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	No	No
Moving Object	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Multi scale DB	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Modèle de processus IS	Oui	Oui	Oui	No	No	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

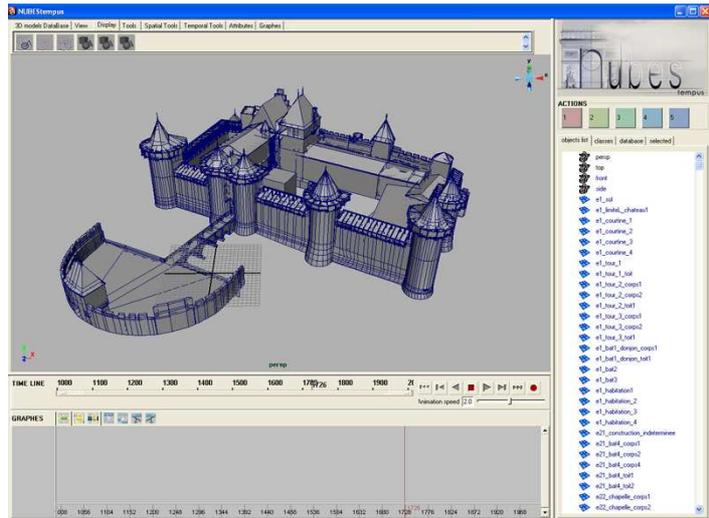
Modèles de données s-t	Durée des étapes de vie	Processus de transformation	Hypothèses multiples	Degré de certitude	Types de changements : Tous les 8 types, Discrète, Continu, Mouvement
Snapshot Model	No	Temps de validation	No	Niveau de détail unique	No
STC	No	Temps de validation / transaction	No	Niveau de détail unique	Discrète
Simple Time Stamping	Oui	Temps de validation	No	Niveau de détail unique	Discrète
Event-Oriented	Oui	Temps de validation	No	Niveau de détail unique	Discrète
3 Domain	No	Temps de validation / transaction	No	Niveau de détail unique	Tous les 8 types, Discrète, Continu, Mouvement
History Graph	Oui	Temps de validation / transaction	No	Niveau de détail unique	Discrète, Continu, Mouvement
STER	Oui	Temps de validation / transaction	No	Niveau de détail unique	Tous les 8 types, Discrète, Continu
O-R	Oui	Temps de validation / transaction	No	Niveau de détail unique	Tous les 8 types, Discrète, Continu
O-O	Oui	Temps de validation / transaction	No	Niveau de détail unique	Tous les 8 types, Discrète, Continu, Mouvement
Moving Object	Oui	Temps de validation	No	Niveau de détail unique	Tous les 8 types, Discrète, Continu, Mouvement
Multi scale DB	Oui	Temps de validation	No	Différents niveaux de détail	No
Modèle processus	Oui	Temps de validation	Oui	Niveau de détail unique	No

ANNEXE D

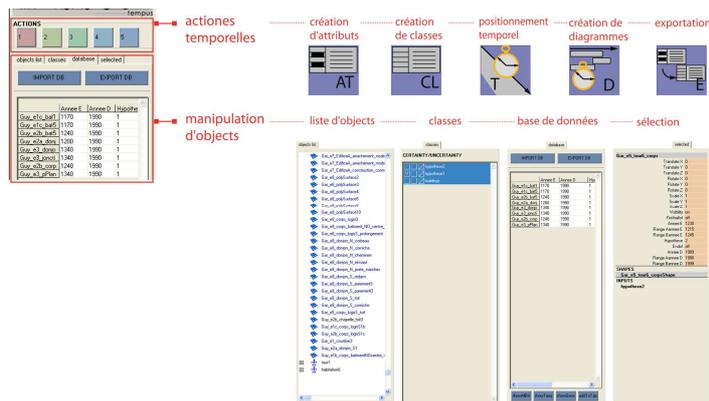
Dispositif de structuration tridimensionnelle d'édifices en
fonction du temps

Gestion du projet.

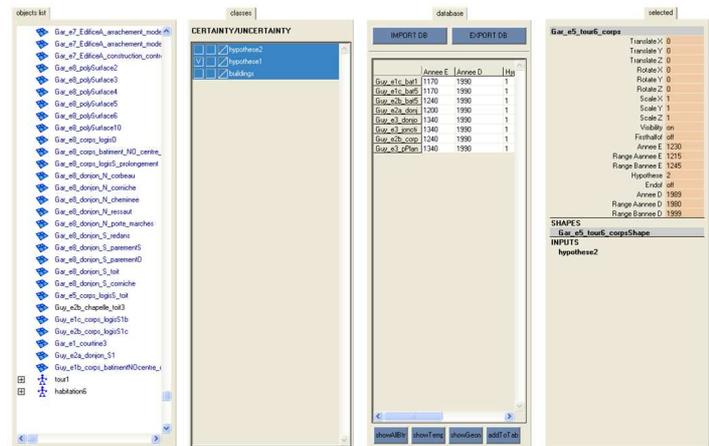
L'interface est divisée en trois modules : le premier, à droite, concerne toutes les tâches pour prédisposer la maquette à la gestion du temps ; le deuxième, en haut, affiche et manipule les diverses restitutions suite à des requêtes ; le dernier en bas permet de visualiser l'existence des objets architecturaux à l'aide des *diagrammes d'état*. Suite à la modélisation tridimensionnelle dans Nubes Forma, le projet est importé dans Nubes Tempus pour construire une maquette évolutive.

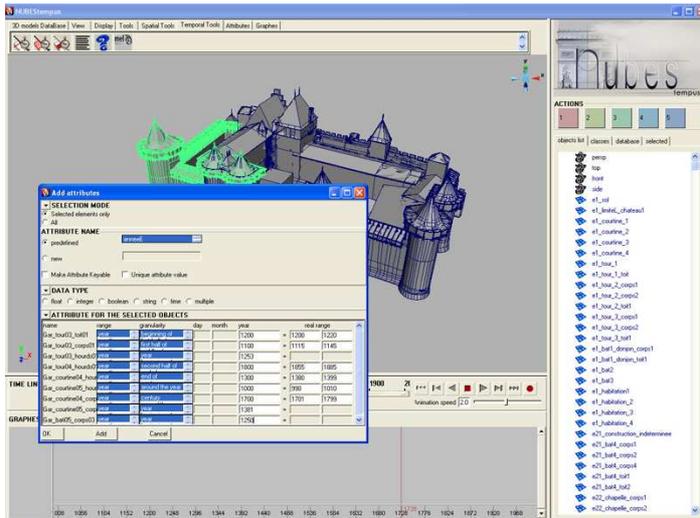


Le premier module. Il est affecté à la création de l'environnement nécessaire pour faire une modélisation temporelle et à la consultation des attributs de chaque objet. En conséquence, ce module est divisé en deux parties : en haut 5 actions successives prédisposent la maquette 3D à la gestion du temps, en bas 4 onglets permettent de manipuler les éléments architecturaux de la maquette et leurs attributs

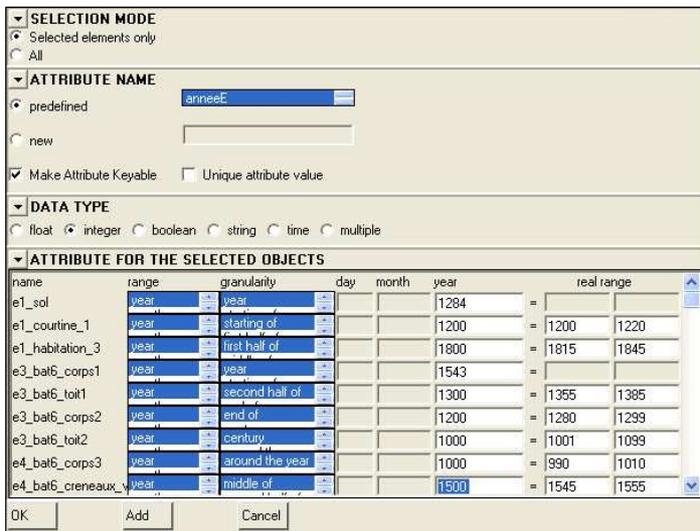


Un onglet affiche la liste d'objets appartenant à la maquette ; le deuxième visualise la structuration en classes (si effectuée) et permet la sélection des objets y appartenant ; le troisième affiche pour les objets sélectionnés la table de géométries contenant les attributs de chacun d'eux et leurs valeurs (si existantes) ; enfin le dernier fait une liste des attributs en détail pour chaque élément sélectionné.

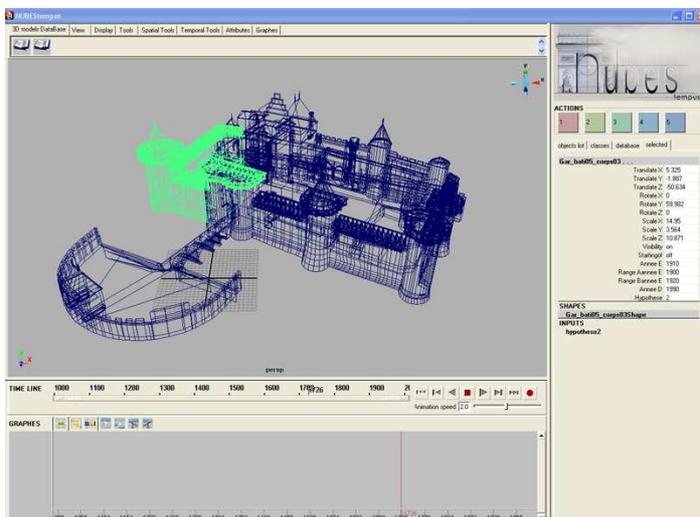




Définition des attributs.
 La première action guide l'utilisateur dans la création d'attributs primaires (dates de début de la construction, d'existence et de démolition, caractérisation de l'objet en tant que certain ou hypothétique, nom de l'hypothèse), et secondaires (des nouveaux attributs).

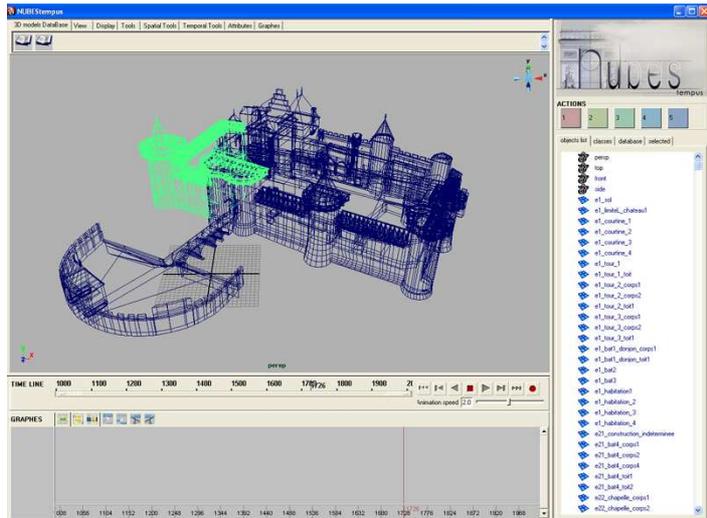


L'interface est prédisposée pour gérer des granularités différentes (le siècle, l'an, le mois, le jour). De plus, la granularité finalement choisie, un menu déroulant restreint la période d'incertitude à des portions de temps plus courtes. Les attributs sont à tous moments modifiables ou effaçables.



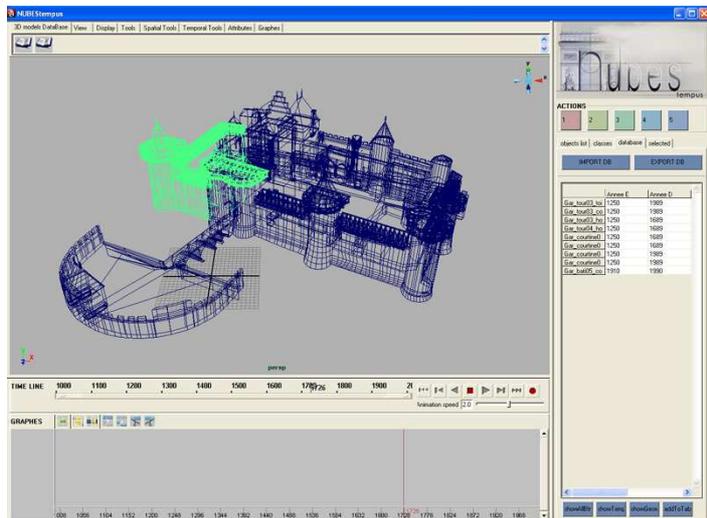
La manipulation des attributs.

Dans le module à droite, le troisième onglet affiche pour les objets sélectionnés la table de géométries contenant les attributs de chacun d'eux et leurs valeurs. Grâce à des boutons, il est possible d'exporter les attributs temporels vers un fichier en format .txt ainsi que d'importer des attributs d'une base existante. Ces opérations permettent de récupérer des bases de données existantes ou d'employer des nouvelles données dans des bases MySQL pour collecter les informations dans un système sur le web.



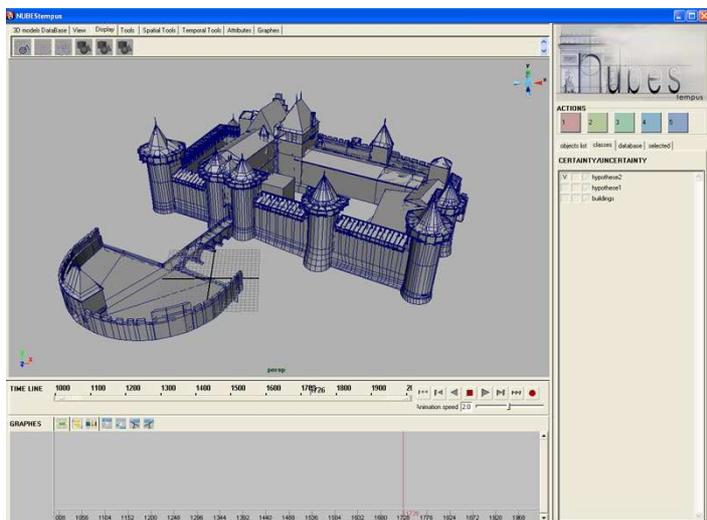
La manipulation des entités géométriques

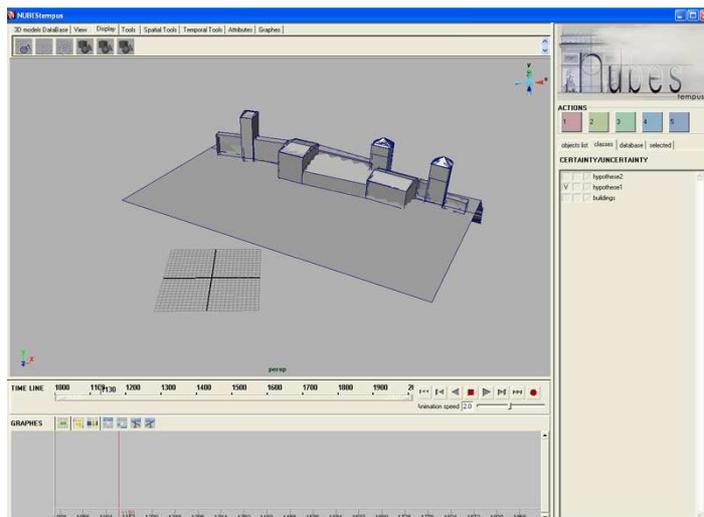
Le dernier onglet du premier module affiche la liste d'objets appartenant à la maquette et permet leur sélection. Les objets affichés sont des géométries ou bien des graphes créés dans l'outil Nubes Forma.



La répartition d'éléments 3D en classes

La deuxième des actions regarde la création des classes. Les objets architecturaux, étant finalement définis comme certains ou hypothétiques, peuvent être arrangés dans des calques différents, qui les regroupent par type. Cela permet une sélection et une visualisation plus rapide des édifices. Les classes sont visibles et sélectionnables dans le deuxième onglet du premier module à droite.



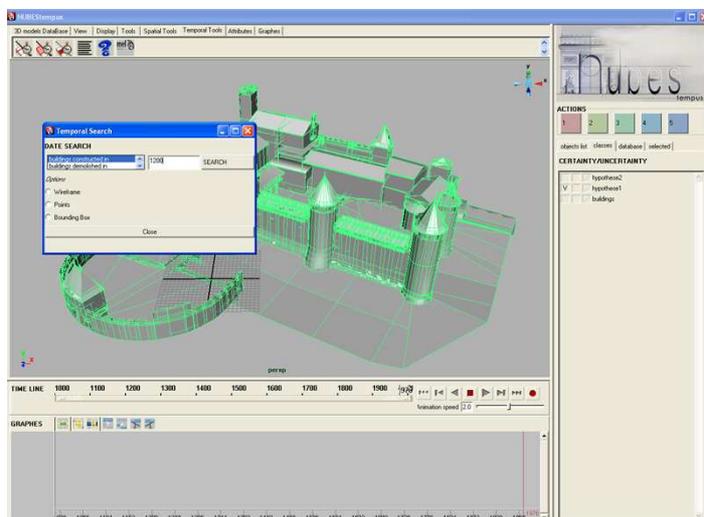


La création des états temporels
 Lorsque des données temporelles sont présentes dans la maquette, il est possible de placer les éléments architecturaux dans l'époque historique. Une barre temporelle et les boutons traditionnels d'un magnétoscope permettent de faire défiler les données dans un sens chronologique ou anti-chronologique, de bloquer temporairement l'animation, de revenir au début ou de se déplacer à la fin de la barre du temps, ainsi que de faire défiler les événements étape par étape. La vitesse de l'animation peut être ralentie ou accélérée selon la nature des transformations



Scénario de validation de la maquette

Une fois les composants architecturaux structurés et classifiés, il est important de pouvoir manipuler la maquette pour vérifier la structuration et éventuellement la modifier avant toutes validations. L'application permet de sélectionner les éléments de la scène 3D et de les visualiser en différentes modalités pour comprendre et vérifier la structuration avant la validation de la maquette.

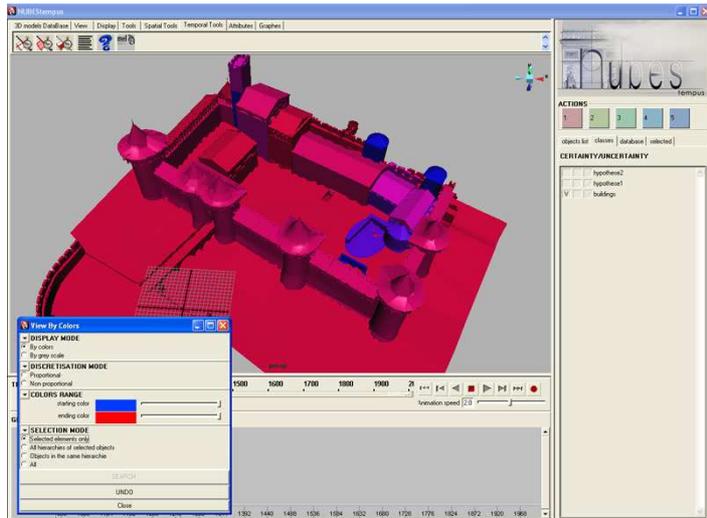


Formulation de requêtes temporelles

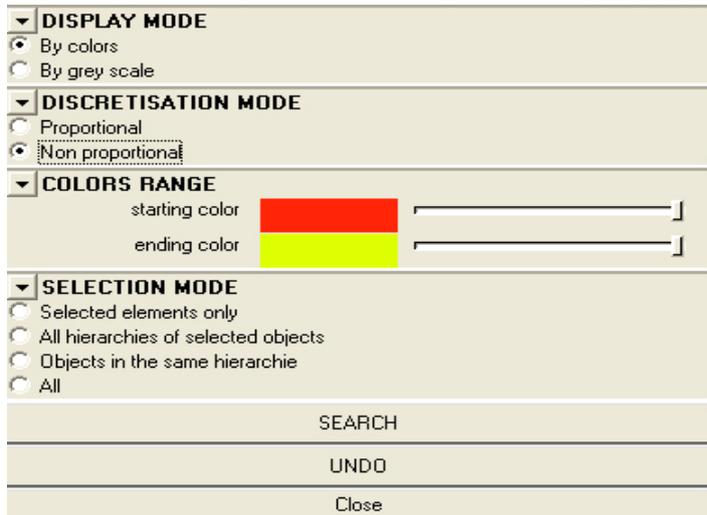
Des requêtes temporelles peuvent être exécutées par rapport aux dates ou aux périodes. Cette opération sert à connaître l'état d'existence ou non d'un bâtiment avant, pendant ou après une date ou un période

Représentation des états temporels

Un codage de couleurs peut être utilisé dans le but de mieux distinguer les entités des bâtiments ayant des temporalités différentes. Les nuances des couleurs doivent être adoptées selon le contexte spécifique à un lieu : il peut se rendre nécessaire de visualiser les éléments architecturaux selon un rapport proportionnel ou non proportionnel entre le rang de dates et l’intervalle de couleur.

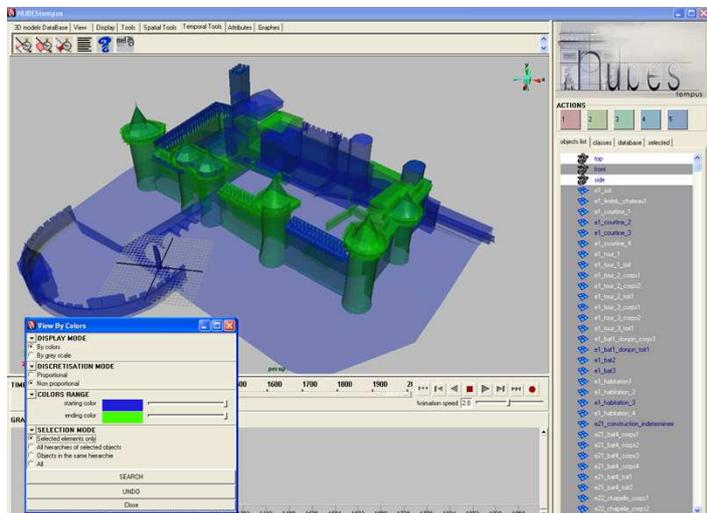


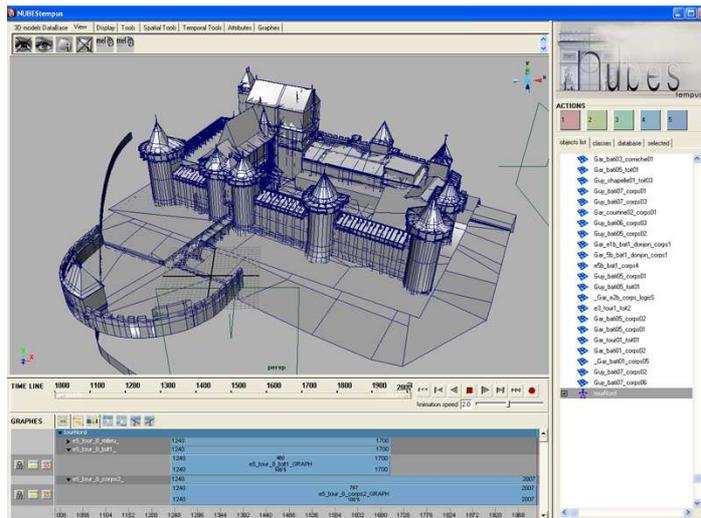
La fenêtre permet de choisir les couleurs affichant les évolutions, et la méthode (proportionnelle ou non proportionnelle). Le choix dépend d’une évaluation préalable sur le type de dates.



Visualisation des hypothèses

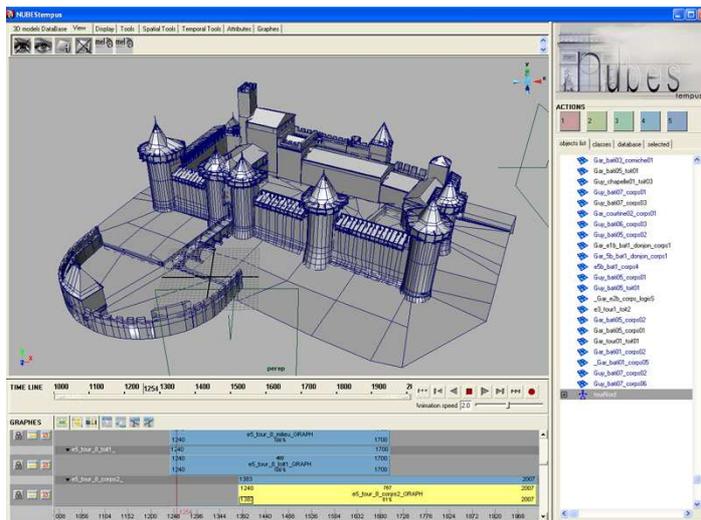
Les hypothèses seront visualisées en transparence, en couleurs ou en fil de fer pour différencier les éléments certains de ceux qui sont flous. Cette opération permet d’apprécier la superposition de diverses hypothèses d’un même complexe d’édifice, d’en constater les diversités ou les similarités.





Création de diagrammes d'existence.

Le troisième et dernier module concerne la visualisation de diagrammes d'existence des corps architecturaux. Un bouton d'action permet d'afficher, à travers les diagrammes, toutes les entités temporelles constituant les édifices et leur durée de vie. Chaque diagramme correspond à l'état d'existence d'un élément dans le temps.



Modification interactive des attributs.

Les dates de construction et de démolition sont visibles pour tous les diagrammes, ainsi que la durée. L'avantage de cet outil est que l'utilisateur peut changer les attributs temporels (début, fin et durée) instantanément à l'aide du graphique : les diagrammes peuvent être modifiés, réduits et agrandis de façon dynamique dans le but de modifier les valeurs temporelles dans la table de géométries.

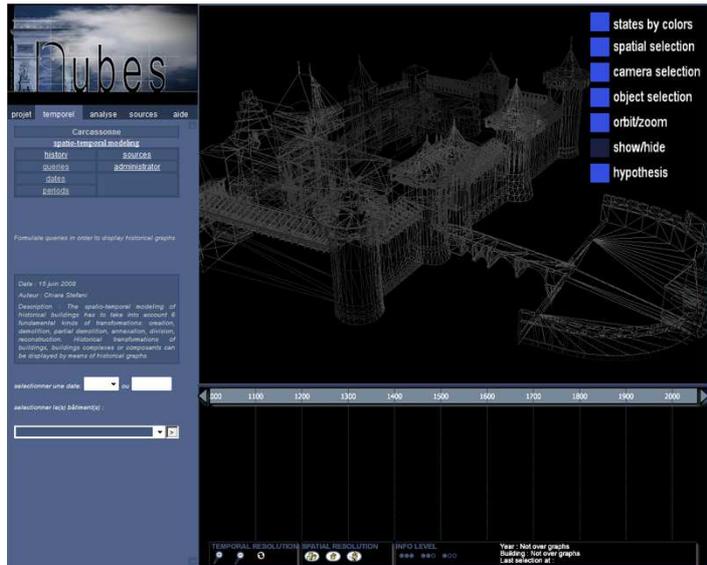
ANNEXE E

NUBES Tempus - Système de consultation des transformations temporelles sur Internet

Système de consultation des transformations temporelles sur Internet

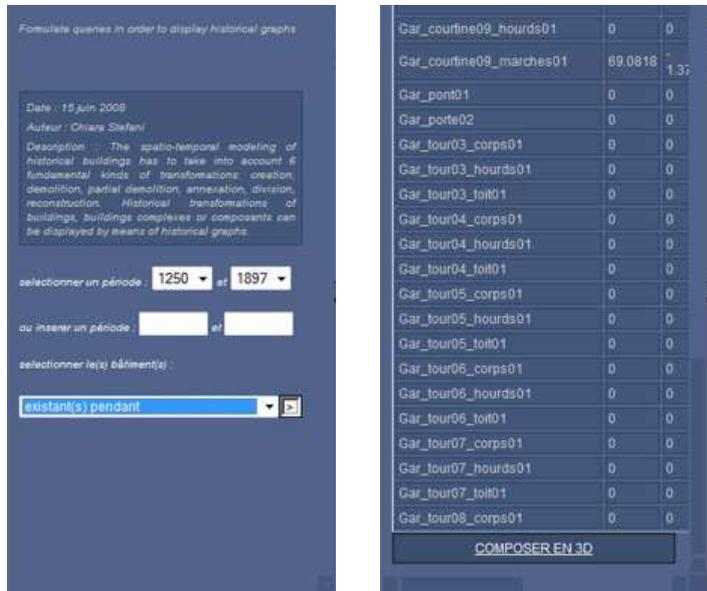
Formulation de requêtes temporelles.

Quand le projet est chargé dans le système de consultation pour le web, une page PHP permet la formulation de requêtes temporelles par date ou par période (par exemple pour afficher les édifices construits/détruits avant, après ou pendant une date/période).



Visualisation des tableaux géométriques

La réponse à une requête est affichée grâce à des tableaux contenant la liste édifices sélectionnés et leurs dates historiques de construction et de démolition. Un bouton permet l'affichage des édifices sélectionnés dans la scène 3D.



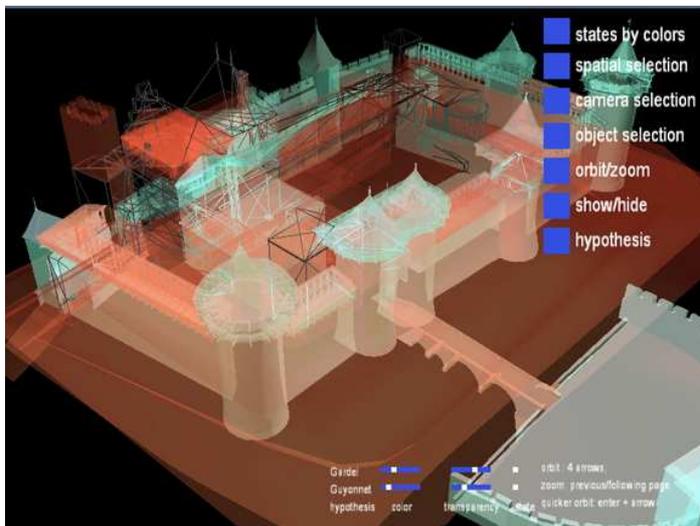
Le système d'informations

Une fois la scène composée, les édifices et les graphes correspondants sont affichés. Il est possible d'interroger directement la scène 3D et le système de graphes historiques.





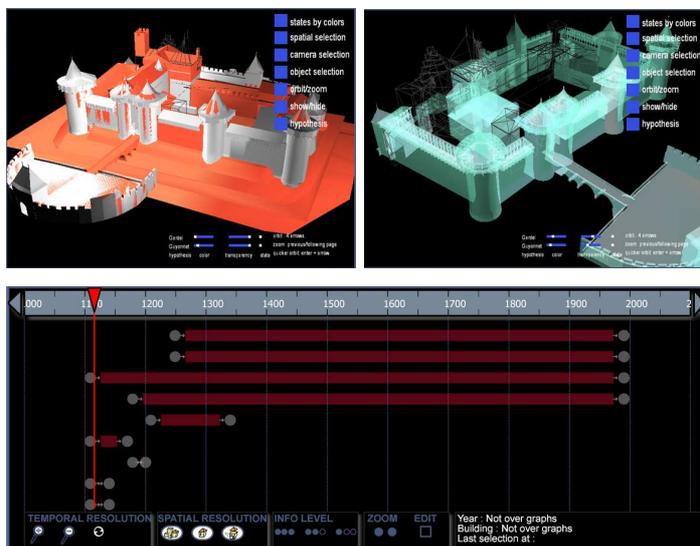
Les stratifications temporelles
Le système permet de visualiser les édifices à travers des nuances de couleurs : les différents états temporels peuvent être isolés et des barres d'états permettent de connaître la densité de construction dans chaque période historique.



Visualisation des hypothèses
Le système permet d'afficher les hypothèses, et de modifier leur visualisation selon deux paramètres :

la couleur : permet de choisir la nuance de couleur en fonction du nombre des hypothèses existantes

le niveau de transparence : permet de visualiser les hypothèses superposées afin d'évaluer les différences et les similitudes.



Les représentations 3D des hypothèses peuvent ainsi être isolées à travers le bouton d'activation / désactivation d'état.

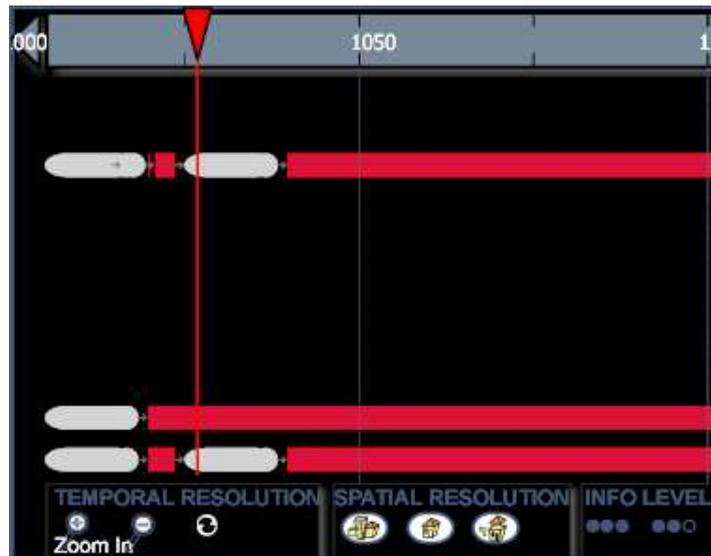
Les étapes historiques peuvent être visualisées avec des codes couleurs ou en couleur neutre, de même, des outils de rotation et zoom aident à manipuler la scène 3D.

Les incertitudes temporelles liées à l'hypothèse des historiens peuvent être affichées en transparence aussi à travers les graphes.

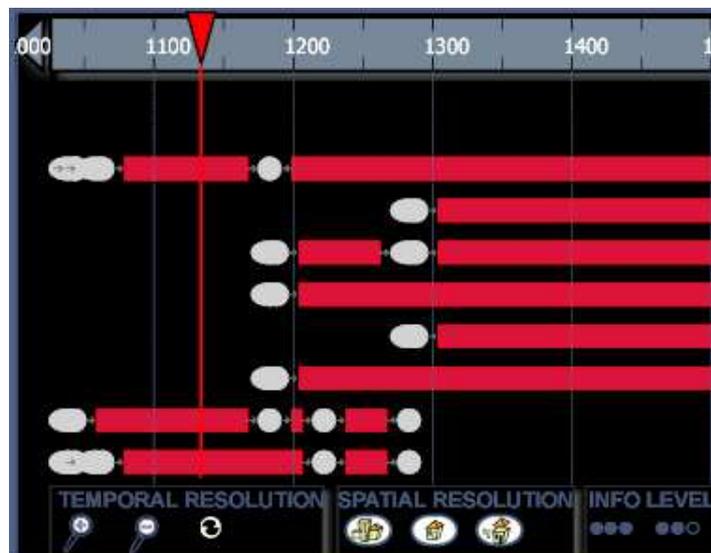
Système de consultation des transformations temporelles sur Internet

Granularités temporelles des graphes historiques.
 Au dessus de la barre, les graphes historiques représentent les édifices sélectionnés dans la base de données à différentes granularités temporelles, selon la nécessité de l'utilisateur.

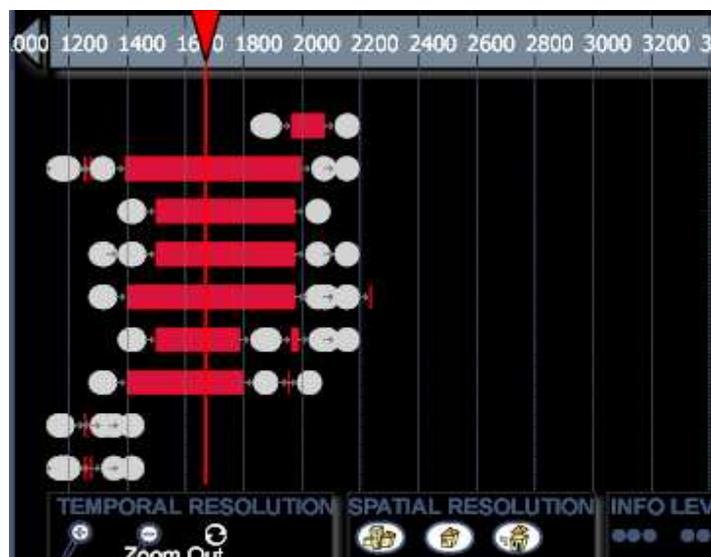
Au passage de la souris sur les graphes, sont affichées des informations concernant l'élément 3D, le nom, la durée de vie des états et des transitions.

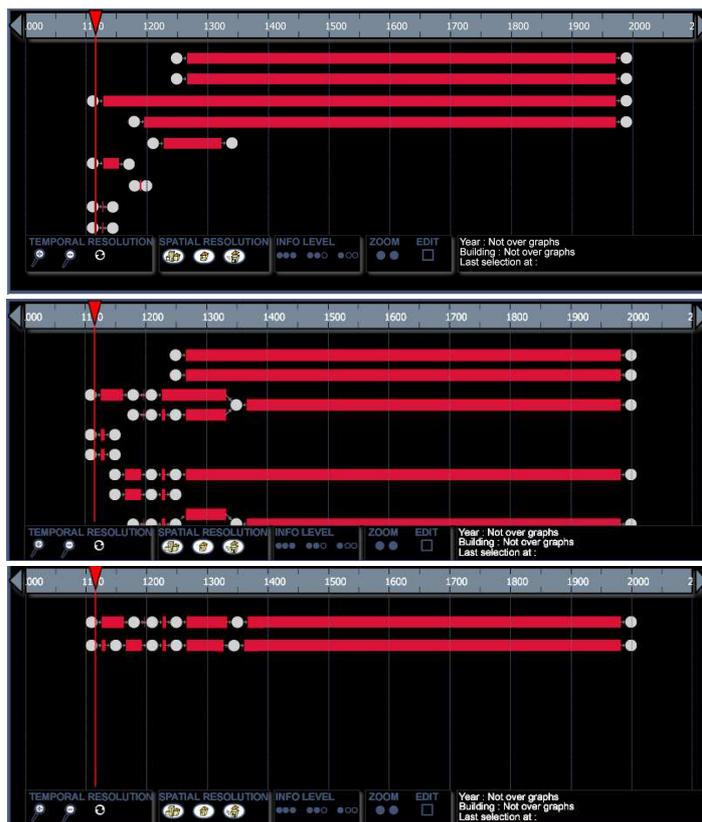


Les trois images représentent les graphes historiques concernant l'hypothèse de restitution des états passés de Carcassonne selon Gardel (2000). Les graphes sont représentés selon résolutions temporelles différentes. La visualisation des transformations est enrichie ou simplifiée en fonction de l'arc temporel visualisé.



Au fur et à mesure que la granularité est plus élevée, plus de transformations peuvent être affichées (en haut). En revanche, les variations sont simplifiées dans des macro-transformations (en bas) si la granularité se réduit.





Granularités spatiales des graphes historiques.
 Au dessus de la barre, les graphes historiques représentent les édifices sélectionnés dans la base de données à différentes granularités temporelles, selon la nécessité de l'utilisateur. Chaque graphe peut représenter une composante d'un édifice (en haut), chaque édifice (au milieu) ou des groupes d'édifices (en bas dans la figure).



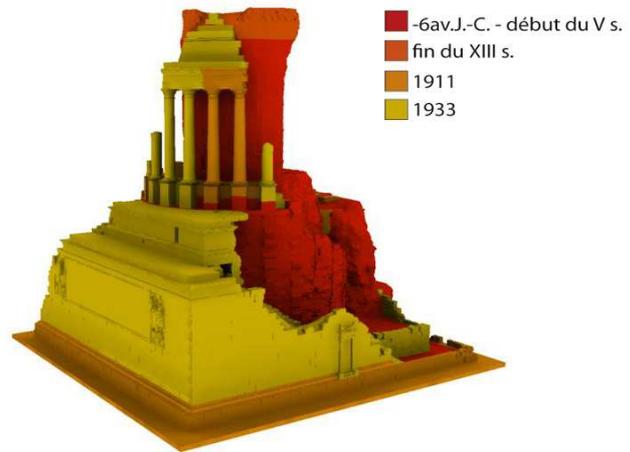
Exemple d'application des graphes à trois terrains d'expérimentation : la Cour d'honneur de la Sorbonne (en haut); Carcassonne (centre); le Trophée des Alpes (en bas).

Dans la Cour d'Honneur de la Sorbonne les graphes affichent des cas de reconstruction de plusieurs édifices au début du XXe siècle.

Les graphes sur Carcassonne illustrent l'hypothèse de l'historien Guyonnet : tout particulièrement deux édifices, suite à plusieurs transformations, sont unis autour du 1350.

Le Trophée des Alpes, autour du XIIe siècle, a subi un changement de fonction (ellipse avec le contour rouge) : en effet il a été transformé en forteresse selon les nombreuses sources documentaires.

Représentation en nuances de couleur des différents états temporels, Trophée des Alpes.

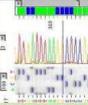
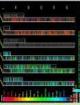
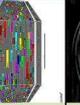
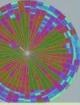
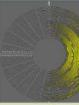
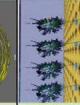


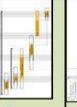
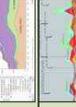
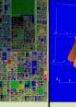
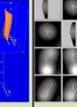
Visualisation de l'incertitude pour la représentation hypothétique d'un état temporel.

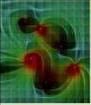
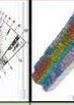
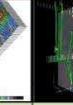


ANNEXE F

Représentation des évolutions

Type	Données			Représentation			Temps		
	Cadre de référence	N° de variables	Niveau d'abstraction	Méthode	Dépendance du temps	Dimension	Primitive temporelle	Structure temporelle	Dimension
 Listes alphabétiques	abstrait	unique	données	orientée texte	statique	1	points	linéaire	-
 TileBars	abstrait	unique	données	orientée texte	statique	1	points	linéaire	-
 Value Bars	abstrait	unique	données	orientée texte	statique	1	points	linéaire	-
 SeeSoft	abstrait	unique	données	orientée texte	statique	1	points	linéaire	-
 Document Lens	abstrait	unique	données	orientée texte	statique	1	points	linéaire	-
 Mur en perspective	abstrait	unique	données	orientée texte	statique	1	points	logarithmique	1
 Visualisation sur un arc	abstrait	unique	données	orientée texte	statique	1	points	linéaire	1
 Cercle-Segments	abstrait	unique	données	orientée pixels	statique	2	points	linéaire	1
 Visualisation à spirale	abstrait	unique	données	orientée graphique	statique	1	intervalles	linéaire	1
 Time Tube	abstrait	multiple	données	orientée pixels	statique	1	points	linéaire	1

Type	Données			Représentation			Temps		
	Cadre de référence	N° de variables	Niveau d'abstraction	Méthode	Dépendance du temps	Dimension	Primitive temporelle	Structure temporelle	Dimension
Diagrammes en arc 	abstrait	unique	données	orientée graphique	statique	1	intervalles	linéaire	1
Lifestreams 	abstrait	unique	données	orientée graphique	statique	3	points	linéaire	1
Simile project 	abstrait	multiple	données	orientée symboles	statique	2	Points/intervalles	linéaire	1
Planning lines 	abstrait	multiple	données	orientée événement	statique	2	intervalles	linéaire	1
Diagrammes en aire 	abstrait	multiple	données	orientée pixel	statique	2	Points/intervalles	linéaire	1
TheemRiver 	abstrait	multiple	données	orientée pixel	statique	2	points	linéaire	1
Cartes, atlas géog./géopolit. 	spatial	multiple	données	orientée cartes	statique / dynamique	2	points	linéaire	-
Tree map 	abstrait	multiple	données	orientée pixels	statique / dynamique	2	points	linéaire	-
Worlds-within-worlds 	spatiale	multiple	données	orientée graphique	statique	3+	points	linéaire	-
HyperSlices 	abstrait	multiple	données	orientée pixels	statique	2	points	linéaire	-
PolarEyez 	abstrait	multiple	données	orientée pixels	statique	2	points	linéaire	1

Type	Données			Représentation			Temps		
	Cadre de référence	N° de variables	Niveau d'abstraction	Méthode	Dépendance du temps	Dimension	Primitive temporelle	Structure temporelle	Dimension
 Flux animées	spatiale	unique	données	orientée pixels	dynamique	2	points	linéaire	-
 Time Wheel	abstrait	multiple	données	orientée pixels	statique	2	points	linéaire	1
 Cluster et calendrier	abstrait	unique	abstraction de données	orientée graphique	statique	2	points / intervalles	linéaire	1
 Flux animées basés sur événements	abstrait/spatiale	unique	données / abstraction de données	orientée symbole	dynamique	2 / 3	points / intervalles	linéaire	1
 Espace 3D	abstrait	multiple	données	orientée graphique	statique	3	points	linéaire	2
 espace 3D hybride	abstrait/spatiale	multiple	données	orientée graphique	statique	3	points	linéaire	1
 Indices	abstrait	unique	données	orientée pixels	statique	3	points	linéaire	2
 GeoTime	spatiale	multiple	abstraction de données	orientée cartes	dynamique	3	points	linéaire	1
 Wormplots	spatial	multiple	données / abstraction de données	orientée graphique	statique	3	points	linéaire	1
 Symbole à spirale	spatiale	multiple	données	orientée symbole	statique	3	points	cyclique	1

Type	Données				Représentation			Temps		
	Cadre de référence	N° de variables	Niveau d'abstraction	Méthode	Dépendance du temps	Dimension	Primitive temporelle	Structure temporelle	Dimension	
Flocking booids	abstrait	unique	données	orientée graphique	dynamique	3	points	linéaire	1	
Disques d'arbres en 3D	abstrait	multiple	données	orientée hiérarchie	statique	2	points	cyclique	1	
Arbres coniques	abstrait	multiple	données	orientée hiérarchie	statique	3	points	linéaire	1	
Arbres hyperboliques	abstrait	multiple	données	orientée hiérarchie	statique	3	points	linéaire	1	
Diagrammes de Gantt	abstrait	multiple	données	orientée événement	statique	2	intervalles	linéaire	1	
Editeur de musique	abstrait	multiple	données	orientée objet	statique	2	intervalles	linéaire	1	
Editeur de montage vidéo	abstrait	multiple	données	orientée objet	statique	2	intervalles	linéaire	1	
Gestion des animations	abstrait	multiple	données	orientée objet	statique	2	intervalles	linéaire	1	
Gestion de succession d'images	abstrait	unique	données	orientée objet	statique	1	points	linéaire	1	
Dynamique de fluides	spatial	multiple	données / abstraction de données	orientée pixels	statique	3	points	linéaire	1	
Table lens	abstrait	multiple	données	orientée texte	statique	2	points	linéaire	1	

Type	Données			Représentation			Temps		
	Cadre de référence	N° de variables	Niveau d'abstraction	Méthode	Dépendance du temps	Dimension	Primitive temporelle	Structure temporelle	Dimension
Lexis Pensils 	spatiale	multiple	données	orientation symbole	statique	3	points	cyclique	1
Infosphere 	spatiale	multiple	données / abstraction de données	orientation graphique	statique	3+	points	linéaire	1

ANNEXE G

Algorithme de visualisation des graphes sur un édifice


```
For (chaque édifice) DO
    Calculer la liste de dates unique concernant toutes ses composantes en ordre ascendant
for (chaque date) DO
    switch (décide quelle transformation correspond à cet date)
    case (la date correspond à une date de création):
        créer cercle/ellipse, flèche, rectangle
    End Case
    case (la date correspond à une date de destruction)
        créer flèche, cercle/ellipse
    End Case
    case (la date correspond à une date d'union)
        for (chaque édifice qui doit être uni) DO
            saute à l'édifice suivant
        end for
        if (l'édifice suit l'union)
            créer flèche (+45° and -45°), cercle/ellipse, flèche (0°), rectangle
        end if
    End Case
    case (la date correspond à une date de division)
        if (l'édifice est le premier de la division)
            créer flèche (0°), cercle, flèche (+45° and -45° ), rectangle
        else
            créer rectangle
        end if
    End Case
    case (la date correspond à une date de reconstruction)
        créer flèche, cercle, flèche, rectangle
    End Case
    case (la date correspond à une date de dégradation)
        créer flèche, rectangle arrondi, flèche, rectangle
    End Case
    case (la date correspond à une date de changement de fonction)
        créer flèche, cercle, flèche
    End Case
    case (la date correspond à une date de variation)
        créer flèche, cercle, flèche, rectangle
    End Case
    End Switch
End for
End for
```

ANNEXE H

Liste de publications

Publications dans des revues avec comité de lecture

Publication acceptée en juin 2010 : L. De Luca, C. Busarayat, C. Stefani, P. Véron, M. Florenzano, “A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage”, *in* : Computer & Graphics.

C. Stefani, L. De Luca, P. Véron, M. Florenzano, “Time indeterminacy and spatio-temporal building transformations: an approach for architectural heritage understanding”, *in* : International Journal on Interactive Design and Manufacturing, Springer Paris, Volume 4, Number 1 / février 2010, pp. 61-74, DOI 10.1007/s12008-009-0085-5.

Publications dans des actes de congrès avec comité de lecture

L. De Luca, C. Busarayat, C. Stefani, N. Renaudin, P. Véron, M. Florenzano, “An Iconography-Based modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage”, Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling International, June 21-23, 2010, Arts et Métiers ParisTech, Aix-en-Provence, France.

C. Stefani, L. De Luca, P. Véron, M. Florenzano, “Modeling buildings historical evolutions”, Proceedings of Focus K3D conference on Semantic 3D Media and Content, 11th and 12th February, 2010, INRIA Sophia Antipolis - Méditerranée, France.

C. Stefani, L. De Luca, P. Véron, M. Florenzano, “Reasoning about space-time changes: an approach for modeling the temporal dimension in architectural heritage”, *in: Proceedings of the IADIS International Conference on Computer Graphics and Visualization 2008, Amsterdam, Netherlands, juillet 2008.*

L. De Luca, C. Busarayat, C. Stefani, P. Véron, M. Florenzano, “NUBES : une plateforme intégrée pour la description, l'analyse, la documentation et le partage de représentations numériques d'édifices architecturaux”, dans David Peyceré , Florence Wierre , Ed. "Architecture et archives numériques. L'architecture à l'ère du numérique : un enjeu de mémoire" - «Architecture and digital archives. Architecture in the digital age: a question of memory», Edition Infolio 2008 - ISBN : 978-2-88474-146-00.

L. De Luca, C. Busarayat, C. Stefani, P. Véron, M. Florenzano, “An integrated framework to describe, analyze, document and share digital representations of architectural buildings”, *in: of VAST 2007: futures technologies to empower the heritage professionals, Brighton, UK, 26-30 november 2007.*

C. Stefani, “Modélisation spatio-temporelle d'édifices patrimoniaux. Proposition d'une approche pour la prise en compte de la dimension temporelle dans l'analyse de la cour d'Honneur de la Sorbonne à Paris”, *in: MIA Journal, vol. 0, n°2 , pp. 101-106, juillet 2006.* <http://www.map.archi.fr/mia/journal>.

