

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.

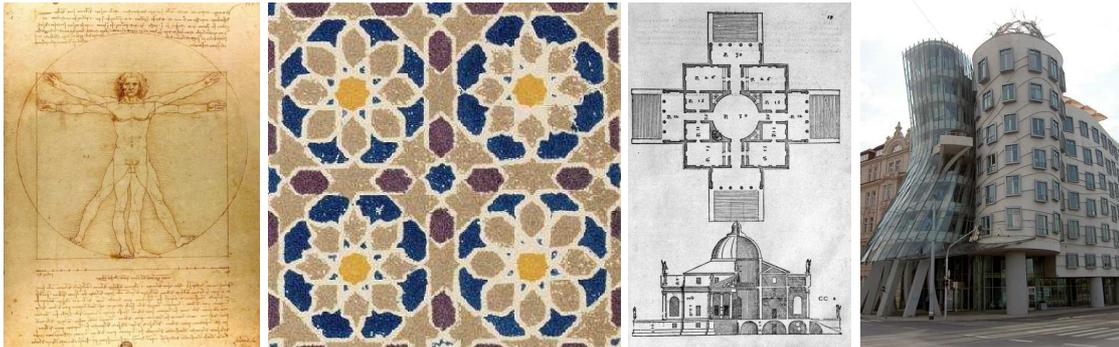


Figure 12. a) L. Da Vinci. Etude de proportions sur le corps humain ; b) Symétrie dans la géométrie des mosaïques murales de l'Alhambra, Grenade, Espagne ; c) Villa Capra dite *la Rotonda*, Vicenza, Italie. A. Palladio, 1566 – 1571, I Quattro libri dell'architettura (Venise, 1601) Collection RIBA, Londres;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

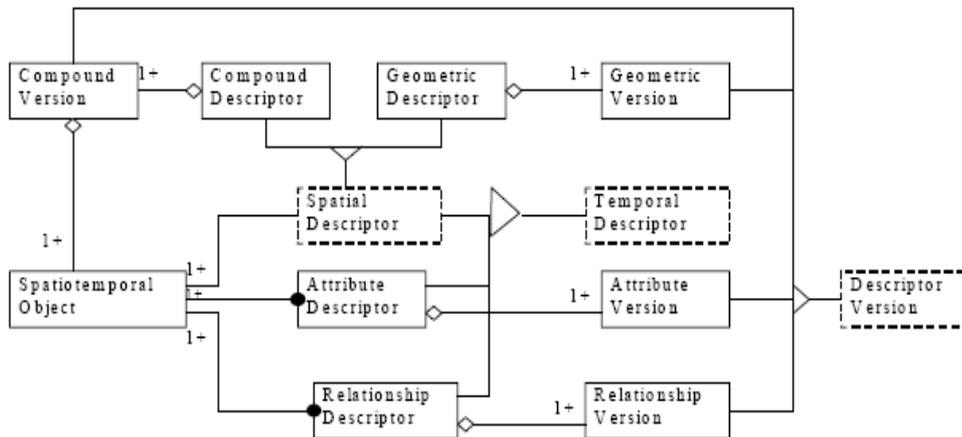


Figure 13. STOM (Spatio-Temporal Object Model). Dans (Renolen 1997b).

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.

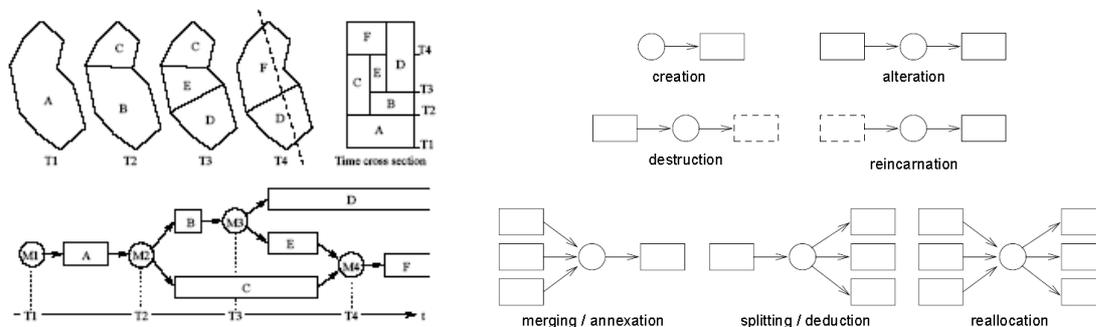


Figure 14 a) Les types de comportements des Objets Temporels. Dans (Renolen 1997a) ; b) Les sept types basiques de changements.

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.

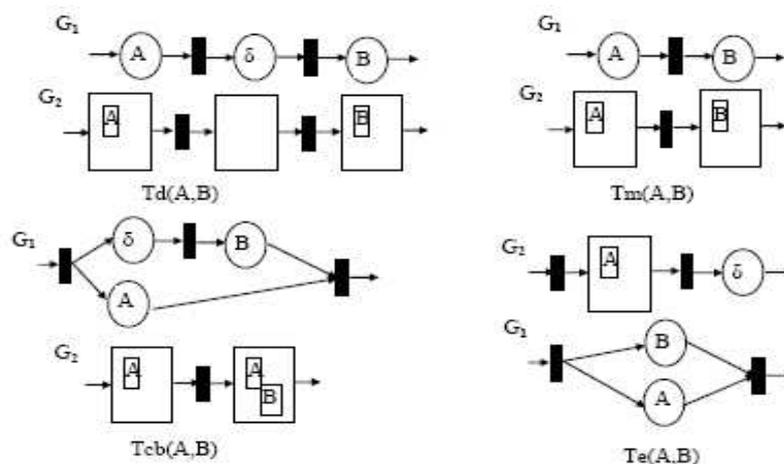


Figure 15. Relation entre les éléments. (Y. Liu & Zhong-xiao Hao 2005).

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.

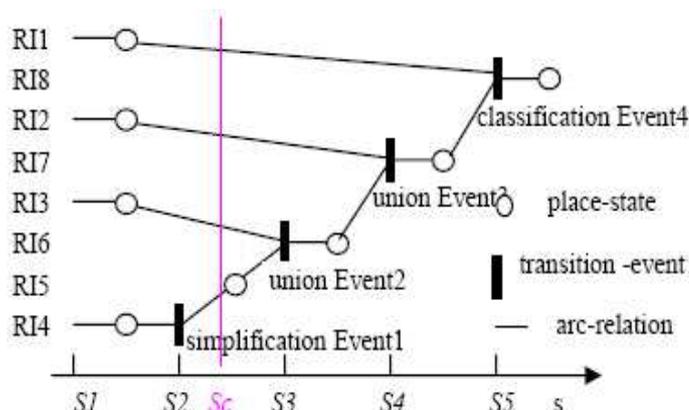


Figure 16. Représentation des états, des événements à échelles multiples et de leurs relations au travers des Réseaux de Pétri. Dans (Yin 2005).

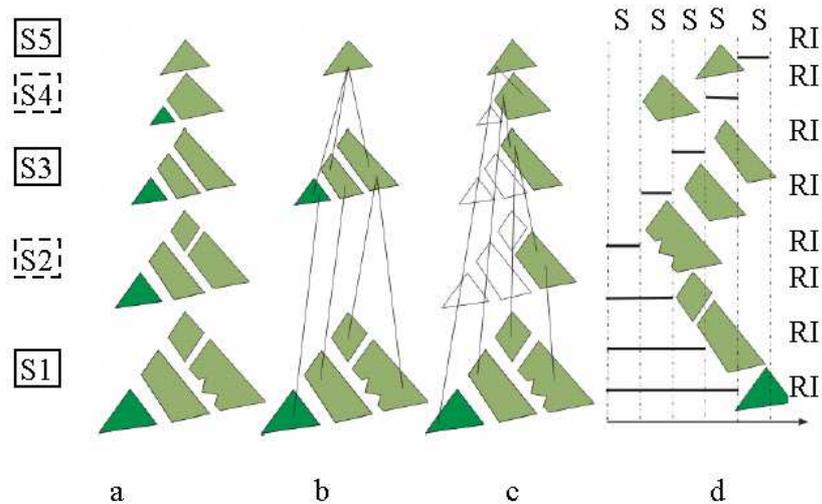


Figure 17. Modèles de représentation à échelles multiples. Représentation d'une carte géographique selon : des instances (a), des hiérarchies (b), les structures de Petri (c), et du cycle de vie (d). Dans (Yin 2005).

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).

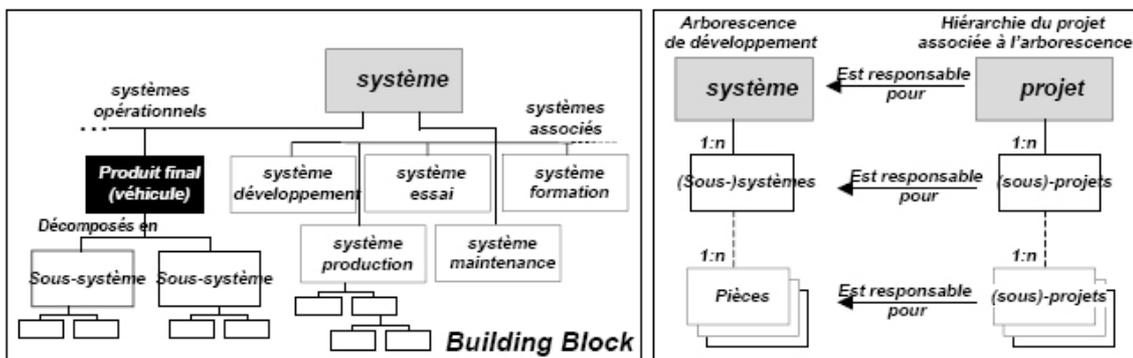


Figure 18. a) Les blocs de construction dans l'EIA 632. b) La correspondance système / projet dans l'ISO 15 288. Dans (Lardeur et al. 2003).

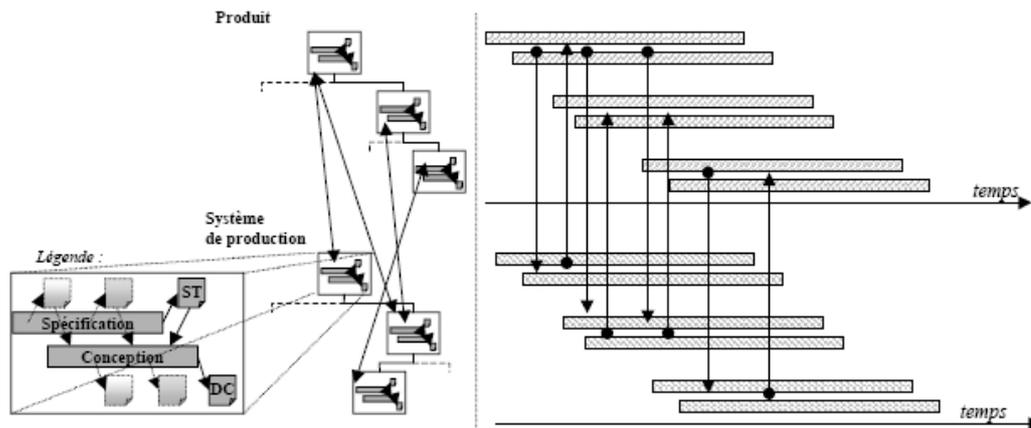


Figure 19. A gauche, représentation des liens entre les systèmes des arborescences de développement sans notion temporelle. A droite, représentation des contraintes de planification avec notion temporelle chez Ford. Dans (Lardeur et al. 2003).

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.

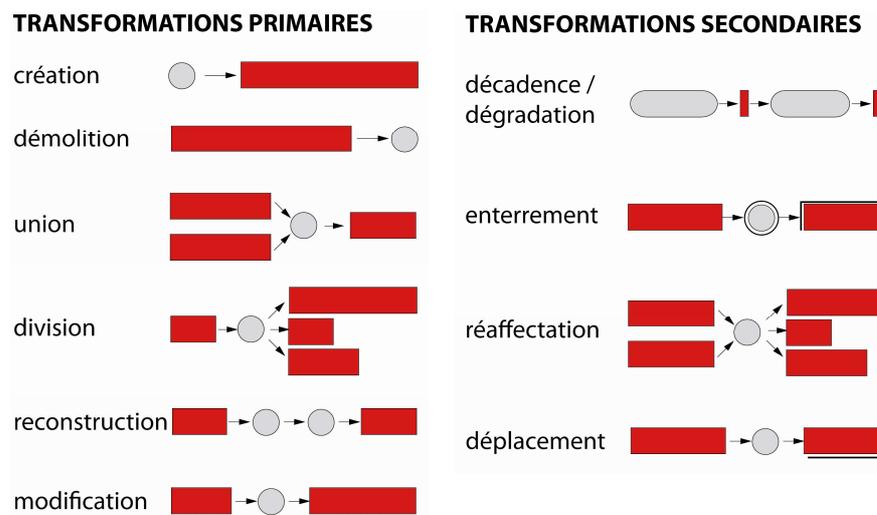


Figure 20. Représentation des typologies de transformations en patrimoine historique.

(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).

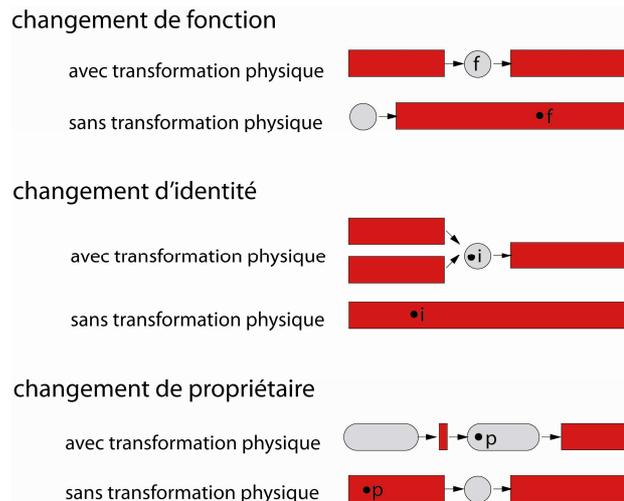


Figure 21. Représentation des changements de fonction, d'identité et de propriété en patrimoine historique.

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.

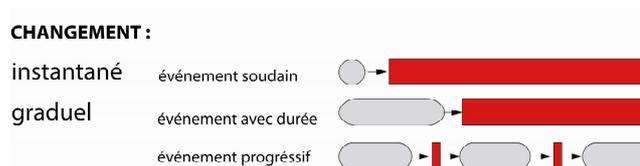


Figure 22. Types de changements : instantanés et graduels (de durées différentes).

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).

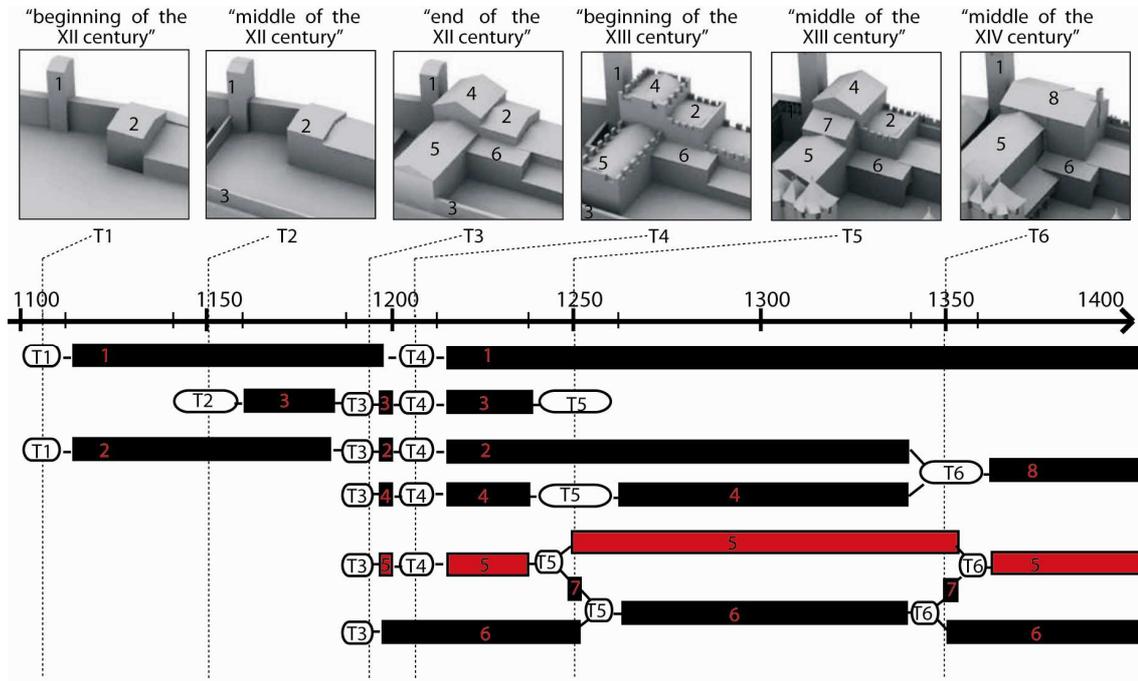


Figure 23. Description des transformations concernant certains édifices à Carcassonne à travers la notation graphique de Renolen. Les rectangles arrondis représentent les durées des transformations ; les relations entre rectangles représentent les types de transformations.

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.

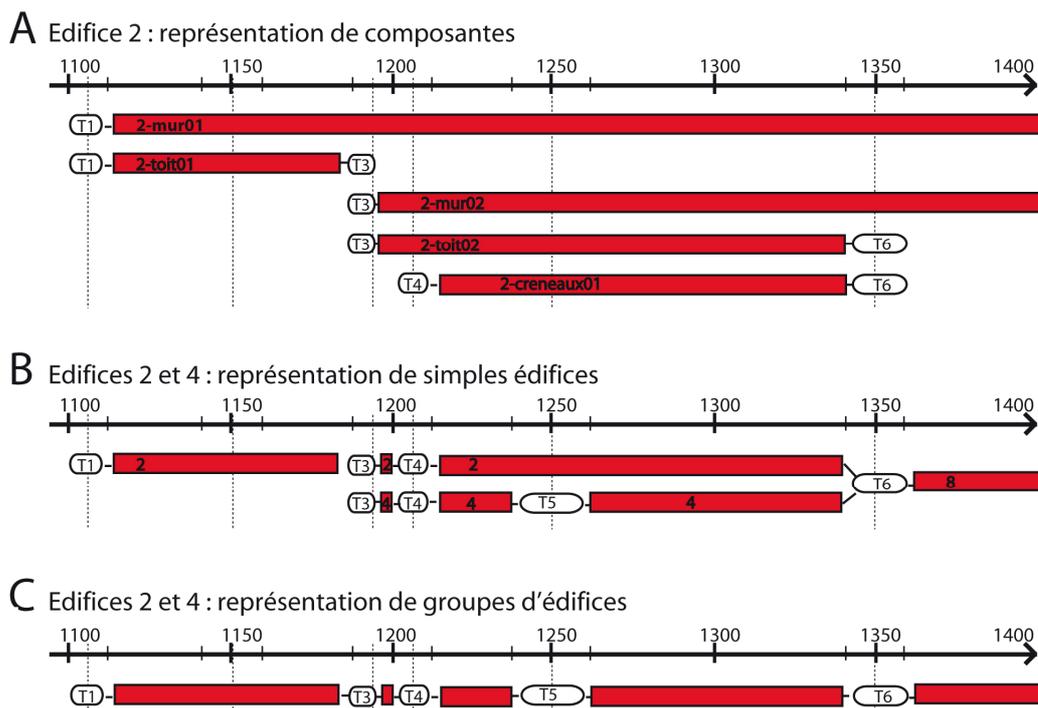


Figure 24. Différentes résolutions spatiales à Carcassonne : a) représentation des différentes parties d'un édifice ; b) représentation de chaque édifice ; c) représentation de groupes d'édifices.

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.

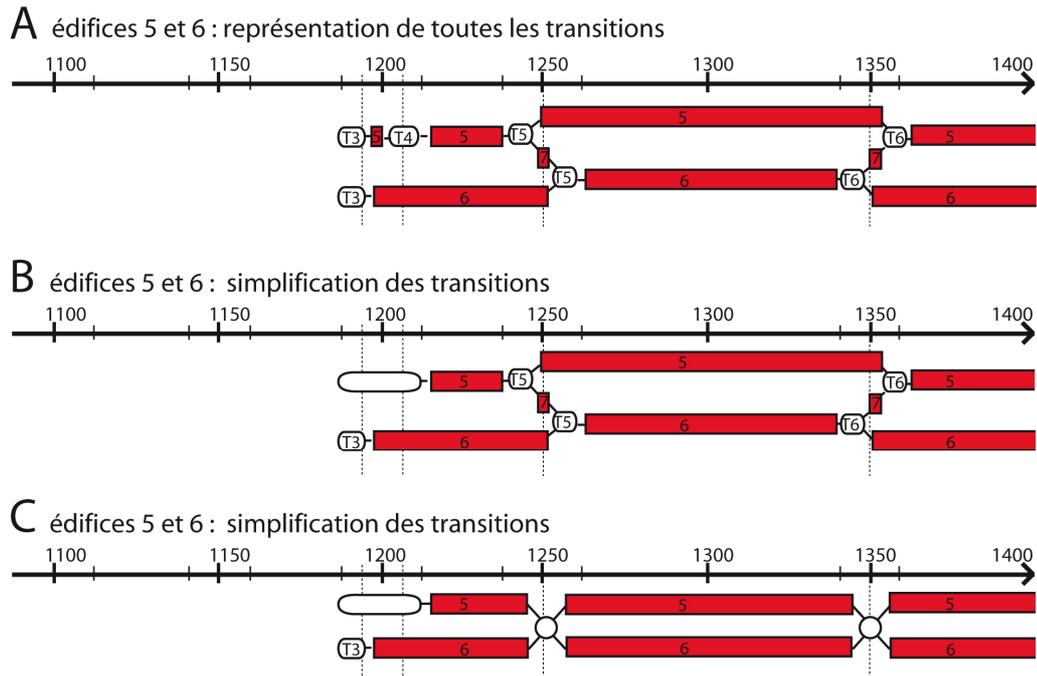


Figure 25. Diminution progressive de la granularité temporelle appliquée à deux édifices à Carcassonne : a) représentation de toutes les transitions ; b) simplification des transitions ; c) simplification ultérieure des transitions : l'union et la division de deux édifices sont représentés par une réaffectation.

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.

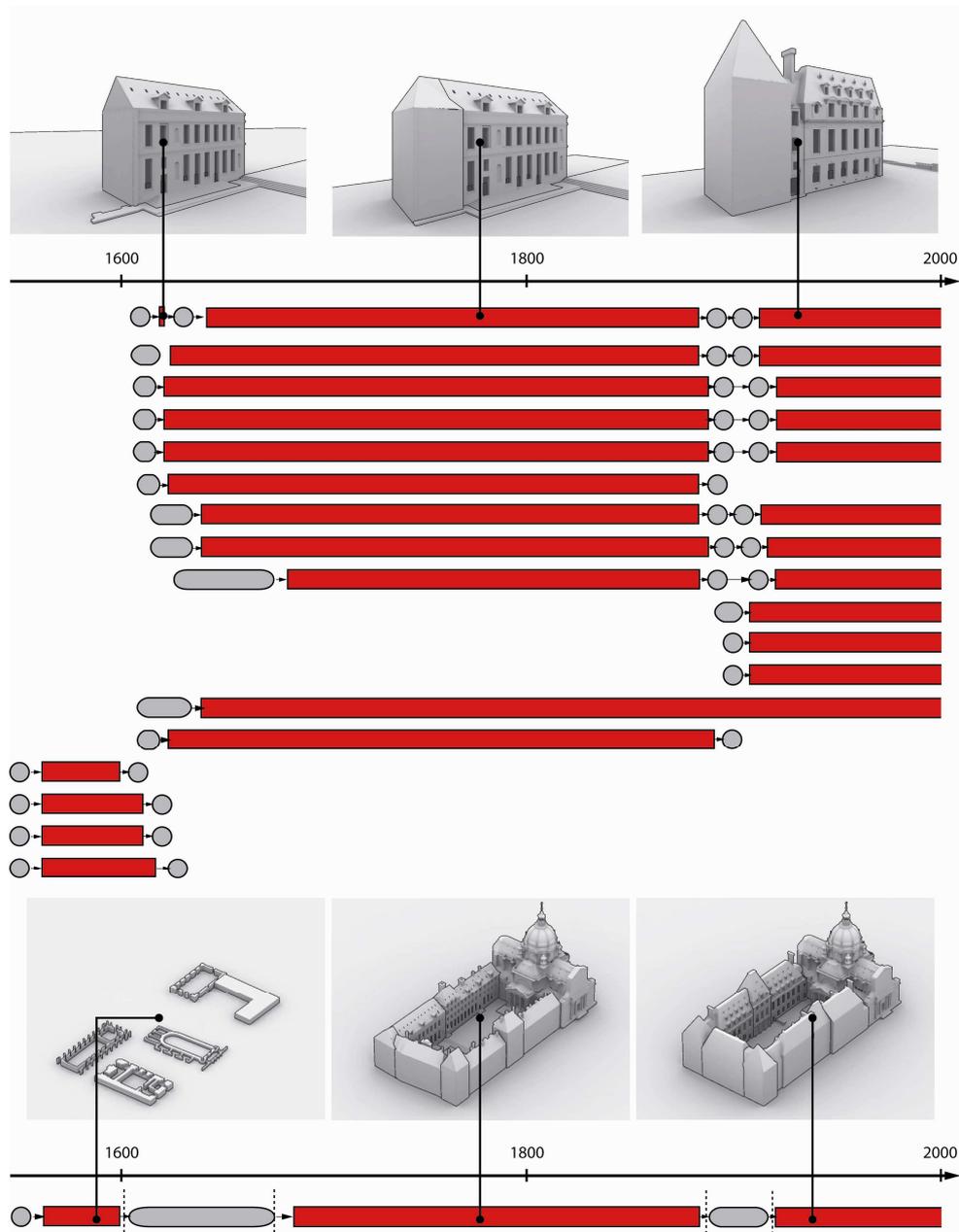


Figure 26. Application des graphes historiques à la Cour d'Honneur de la Sorbonne, Paris. La représentation de l'ensemble architectural permet de décrire les trois grandes étapes qui se sont déroulées.

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.

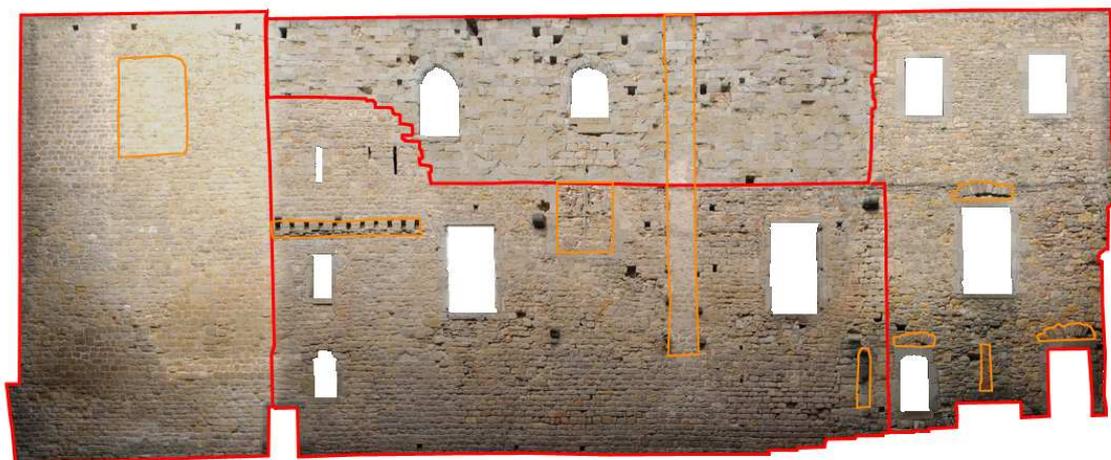


Figure 27. Façade sud de la Cour de Midi dans le Château Comtal de Carcassonne. Diverses stratifications temporelles sont lisibles sur l'orthophoto de la façade.

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.

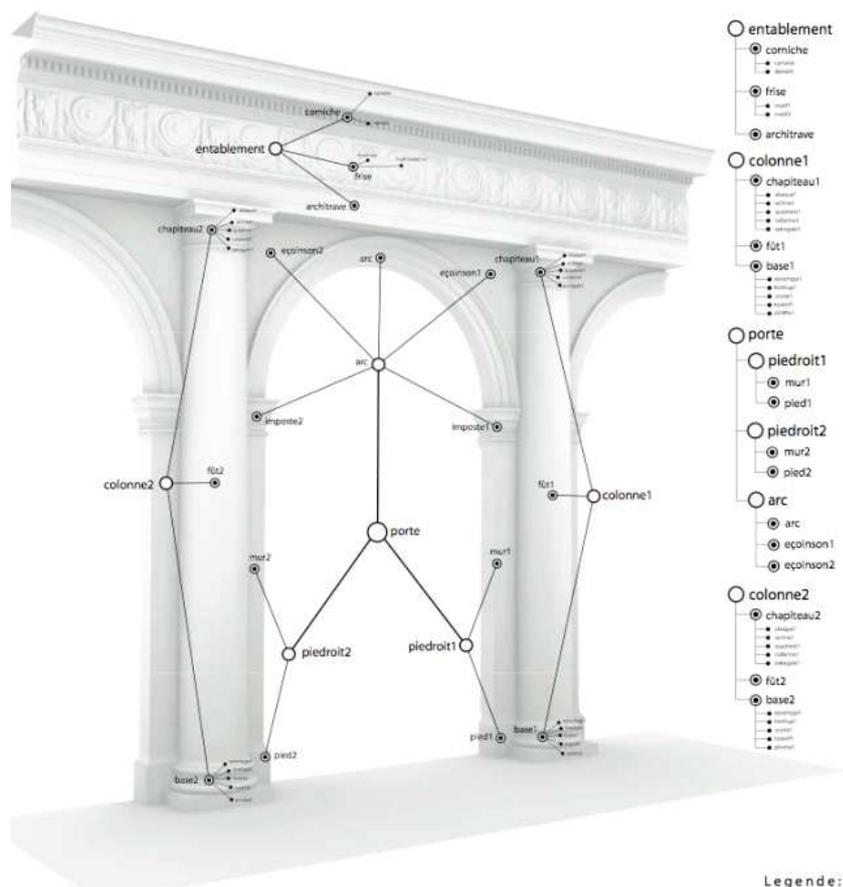


Figure 28. Hiérarchie de graphes de relation (De Luca 2006).

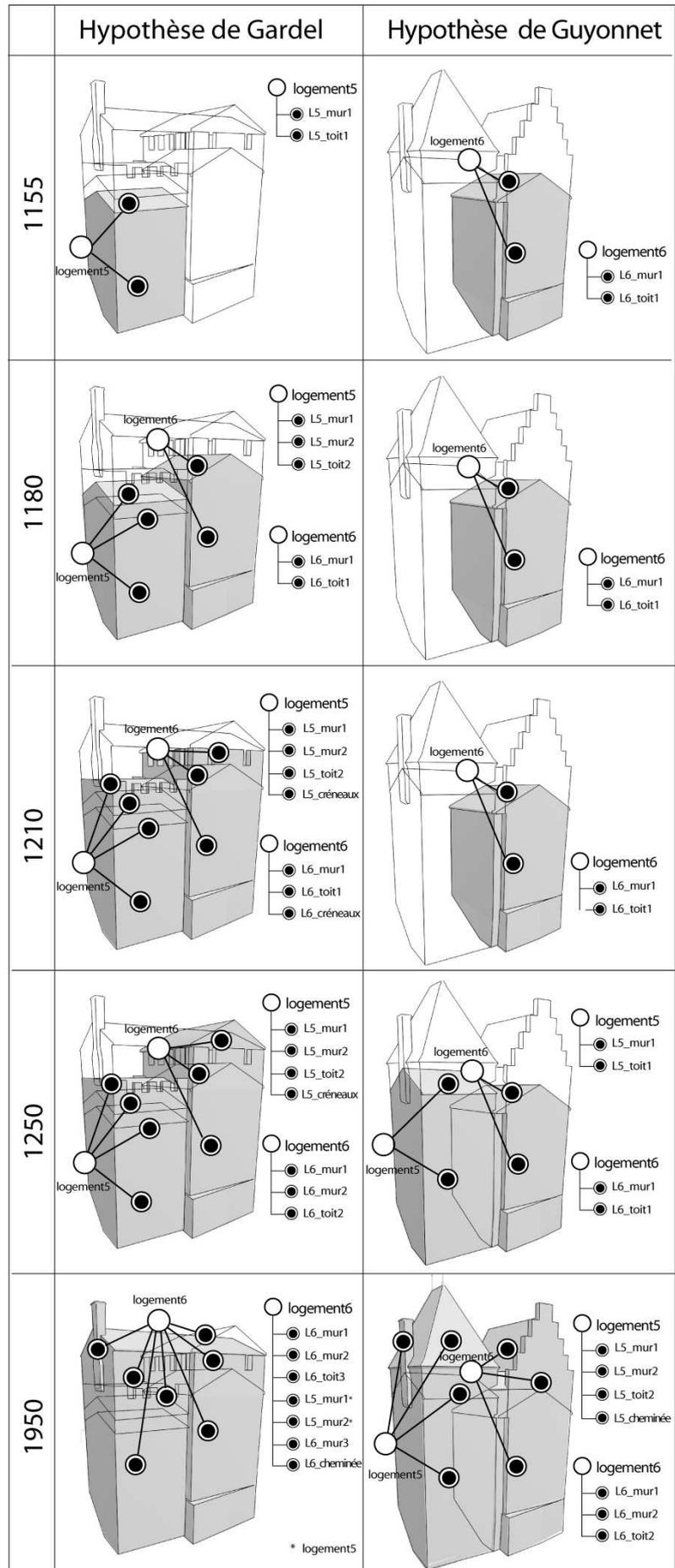


Figure 29. Les deux restitutions hypothétiques de Guyonnet et Gardel pour deux logements/tours à Carcassonne. Schéma des graphes de relations qui se croisent entre les éléments.

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.

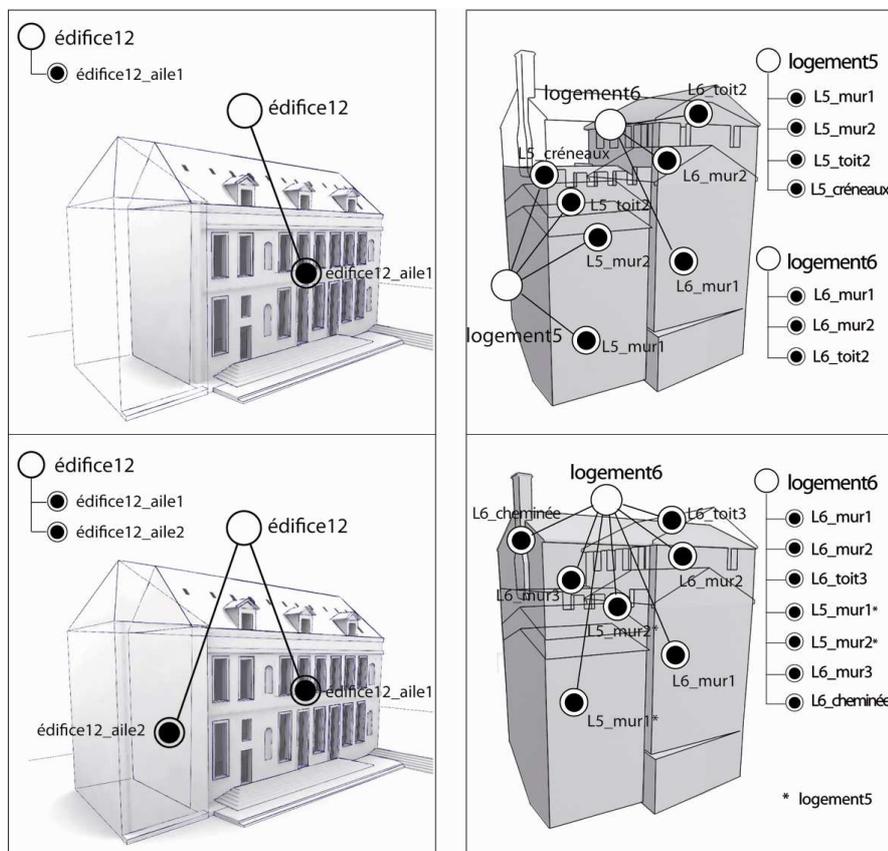


Figure 30. Entités temporelles dans le cas, à gauche, de la Sorbonne (macro-transformations) ; à droite, de Carcassonne (micro-variations).

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 :

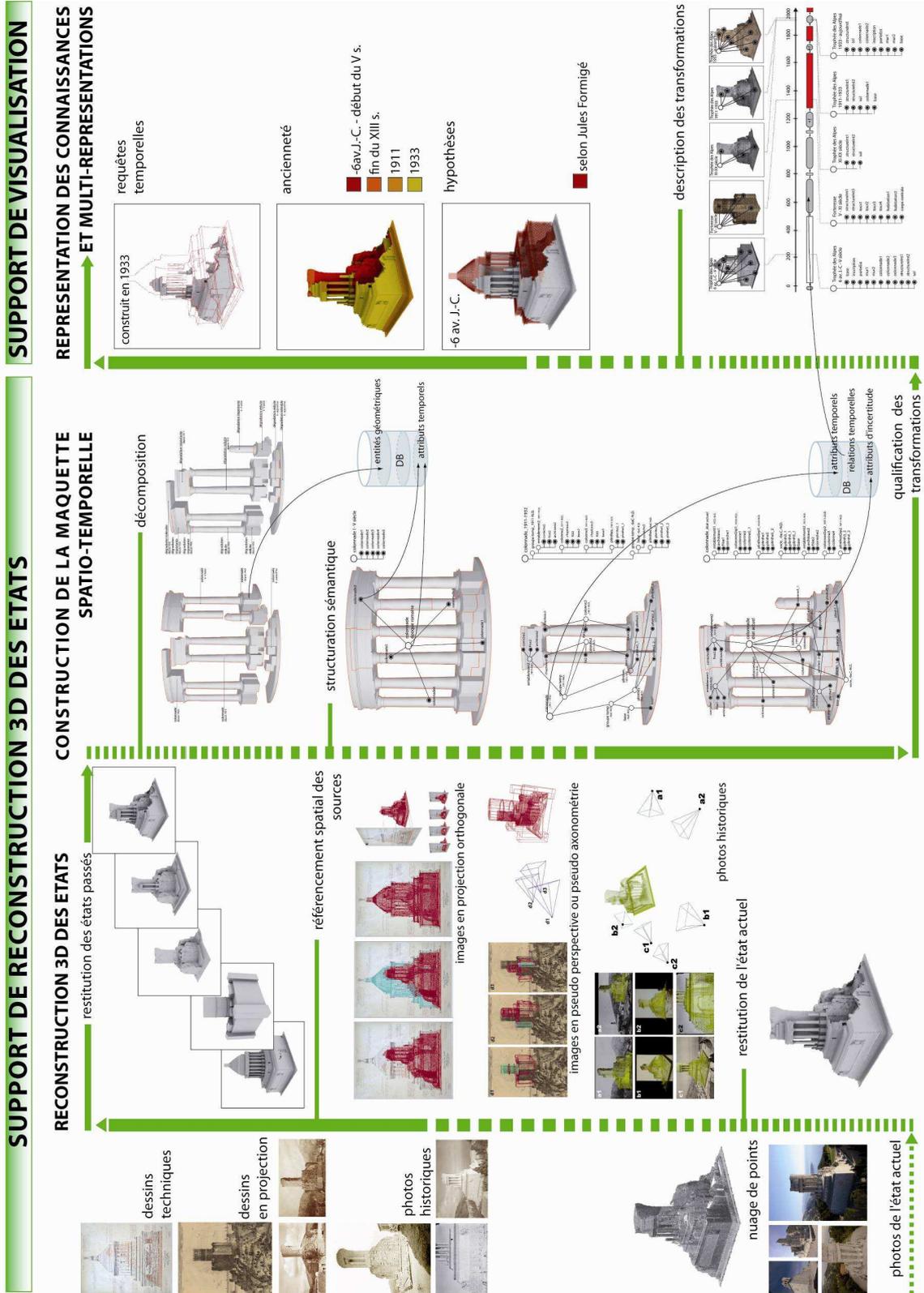


Figure 31. Schéma général de l'approche proposée.

- 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).