

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'expliciter la documentation temporelle ; d'autre part les

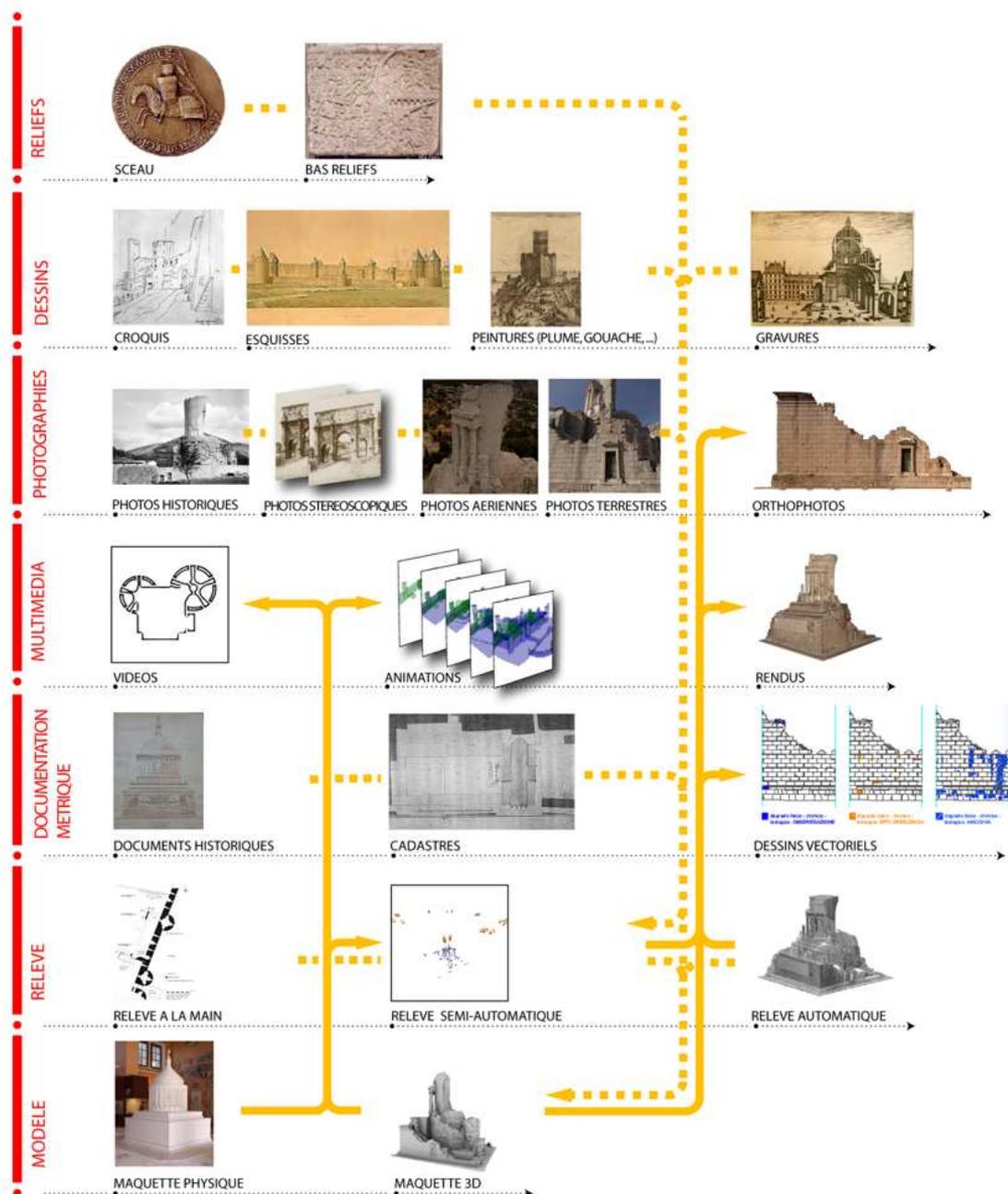


Figure 1. Synthèse des sources documentaires graphiques permettant de documenter un site historique. Les traits pointillés mettent en relation les sources bidimensionnelles à partir desquelles un modèle 3D peut être reconstitué. Inversement, les traits jaunes continus indiquent les sources graphiques 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 1er siècle av. J.-C. ou Palladio au XVIe 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).

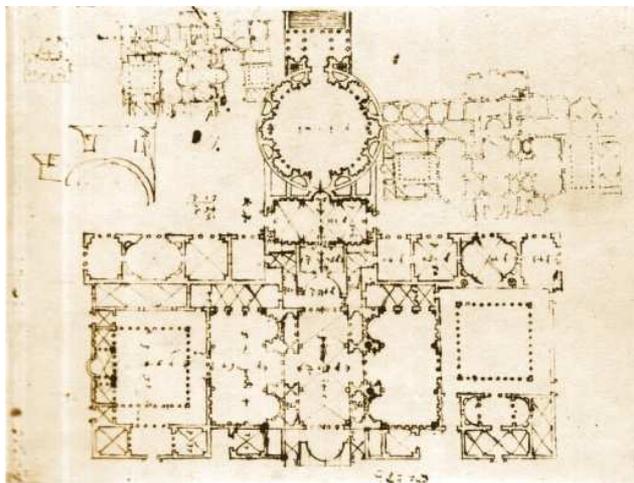


Figure 4. Andrea Palladio, Thermes d' Agrippa et Panthéon, RIBA, Londres, Vol. VII, fol. 2.

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.

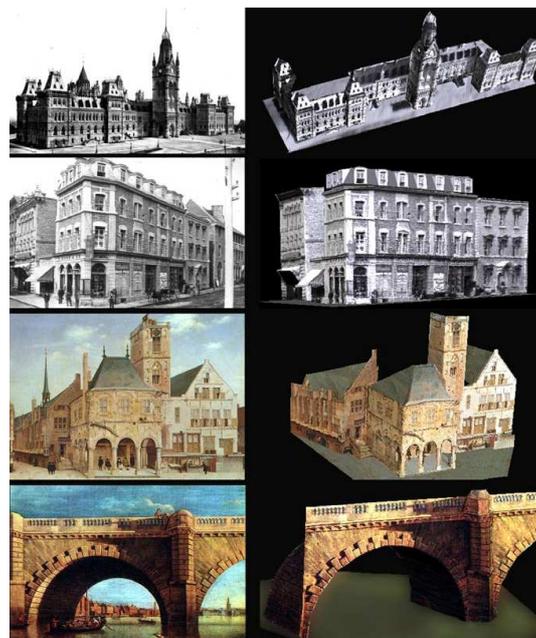


Figure 7. Reconstructions 3D à partir de peintures et photos anciennes (El-Hakim 2001).

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

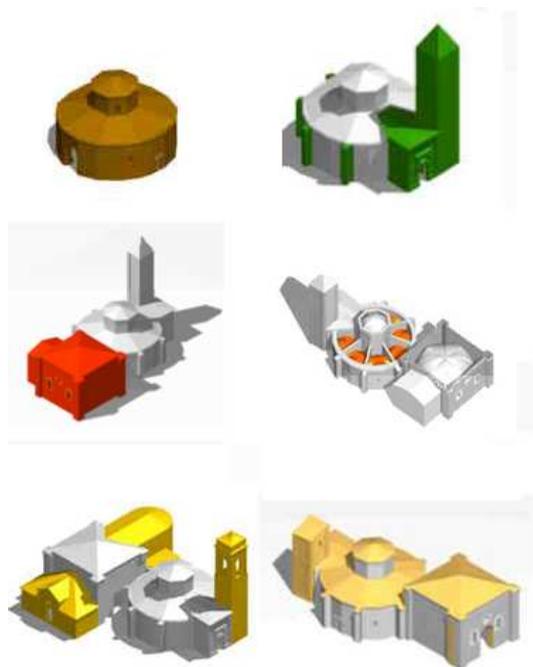


Figure 8. Etapes historiques de restitution de l'église de San Pietro, Asti, sur 800 ans : du XII^e siècle jusqu'au 1930, (Spallone 2005).



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.

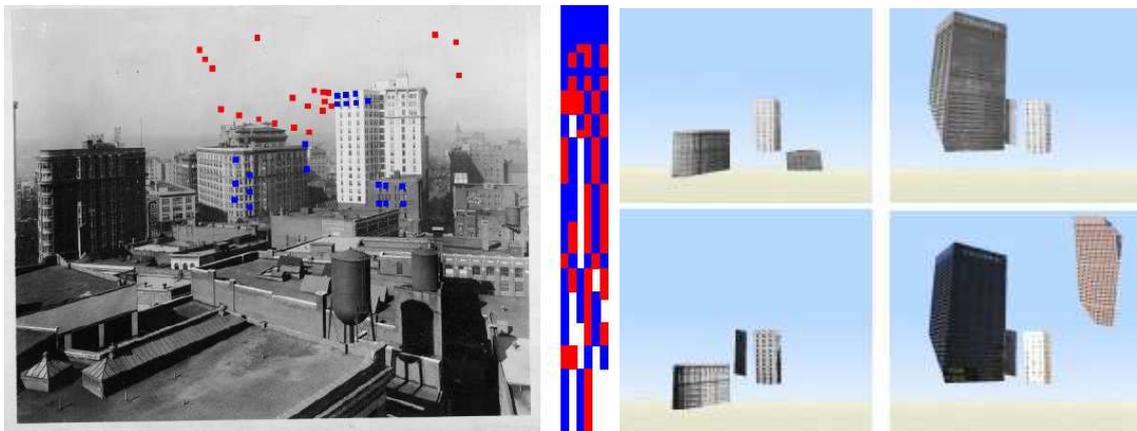


Figure 10. 4D cities : à gauche, classification des correspondances dans une matrice de visibilité ; à droite, structuration de la maquette spatio-temporelle en fonction du temps.

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.

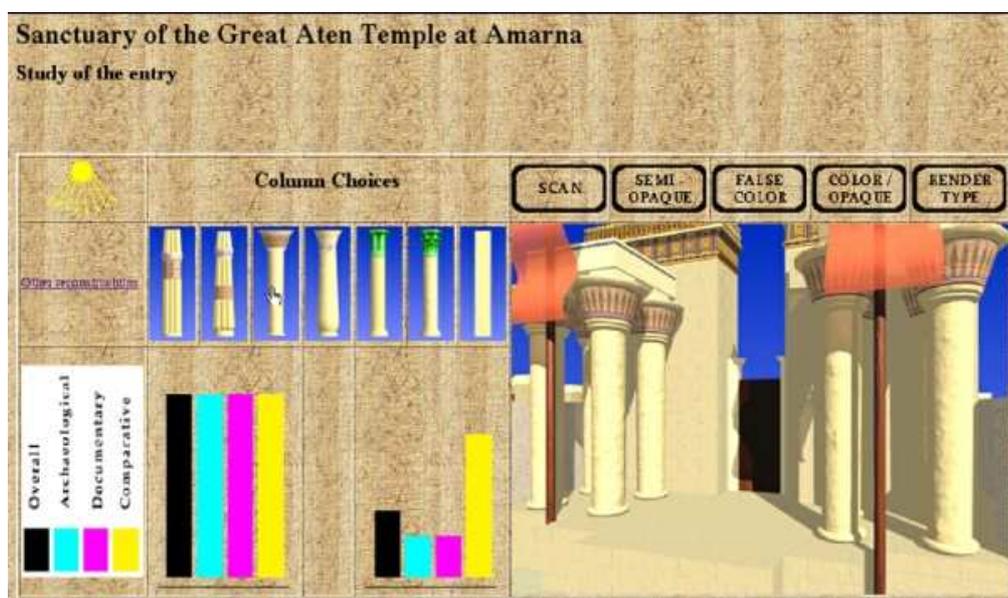


Figure 11. Restitution tridimensionnelle hybride d'opacité et de tonalité (Kensek et al. 2004).

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.

