
Modélisation des évolutions

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

Sauvegarde de l'historique des évolutions

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

7.1.4. Topologie et granularité temporelle

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

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

7.1.5. Exploitation de l'historique des évolutions

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

7.2. Perspectives de recherche

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

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

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

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

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

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

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

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

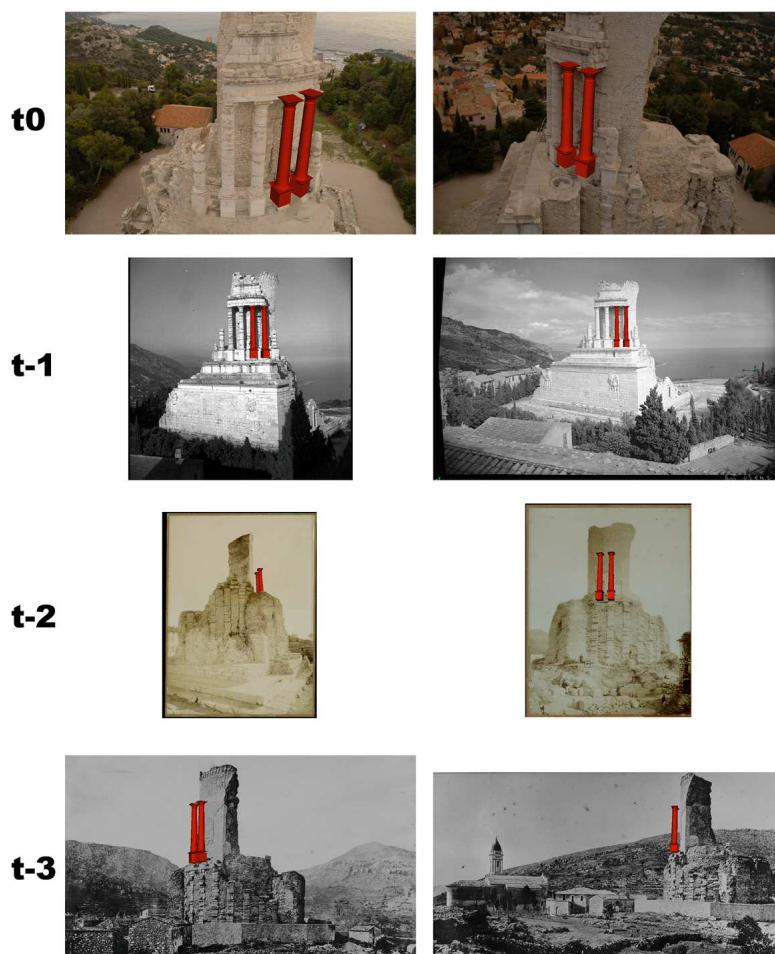


Figure 67. Recherche de sources iconographiques à partir d'entités.

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



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

7.2.2. Spatialisation de l'incertitude

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

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



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

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

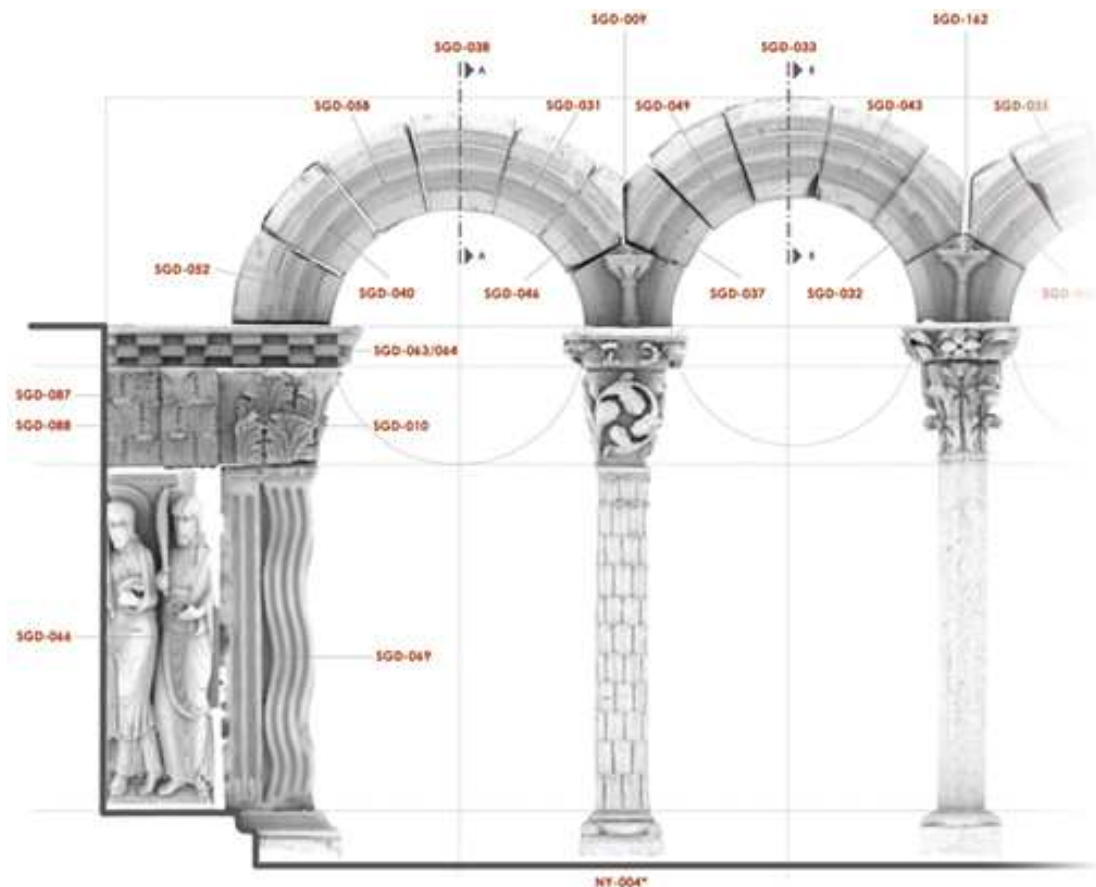


Figure 70. Anastylose virtuelle des fragments du cloître de Saint Guilhem le Désert.

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

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

seulement la position de découverte et celle actuelle des éléments dispersés, mais aussi les diverses solutions possibles sur le positionnement supposé et le pourcentage de probabilité liée à chaque position hypothétique.

Visualisation de la spatialisation de l'incertitude. La dernière étape concernant la spatialisation de l'incertitude concerne sa visualisation. Une marge d'erreur pourrait être calculée afin de représenter plusieurs paramètres : la distance entre la restitution et la source iconographique utilisée, l'écart entre restitutions à diverses résolutions (en fonction des sources adoptées), ou encore l'écart entre la position réelle du fragment et de sa restitution. Cette analyse peut amener à différents niveaux d'incertitude sur la même restitution hypothétique. Un premier effort de visualisation a été effectué au sein du laboratoire Map à l'occasion de la formation DPEA 2007-2008 sur le mobilier de la Chartreuse à Villeneuve-lès-Avignon (Gard). Le tableau (Figure 71) rassemble les éléments de mobilier et de décor de l'église conventuelle, associés à leurs références documentaires. Actuellement, une thèse est en cours à ce sujet.

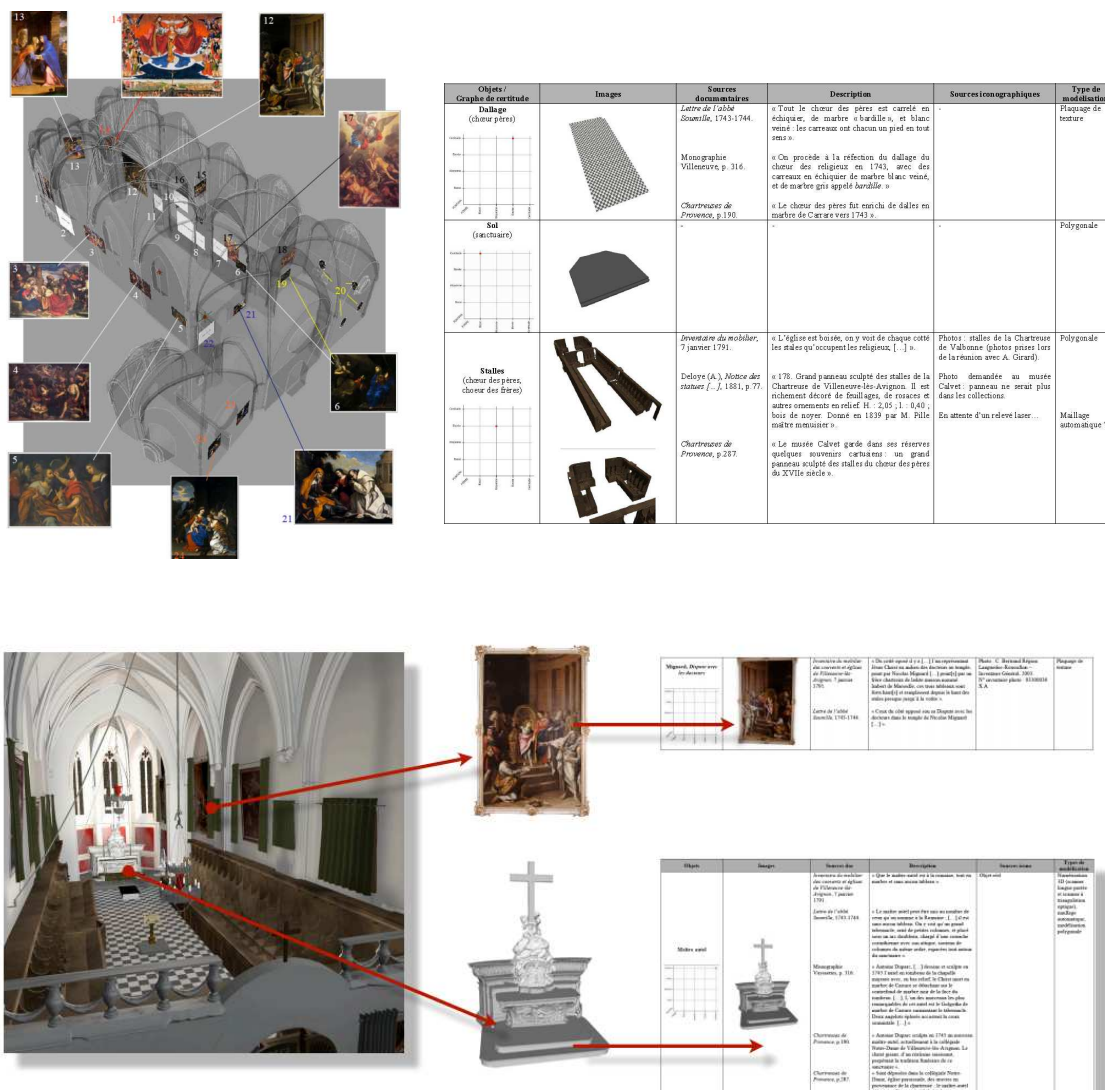


Figure 71. Exemple de spatialisation de l'incertitude sur le mobilier de la Chartreuse à Villeneuve-lès-Avignon (Gard). Le tableau rassemble les éléments de mobilier et de décor de l'église conventuelle, associés à leurs références documentaires. Images d'Aurélien Favre-Brun.

7.2.3. Résolutions multiples en fonction des sources

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

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

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

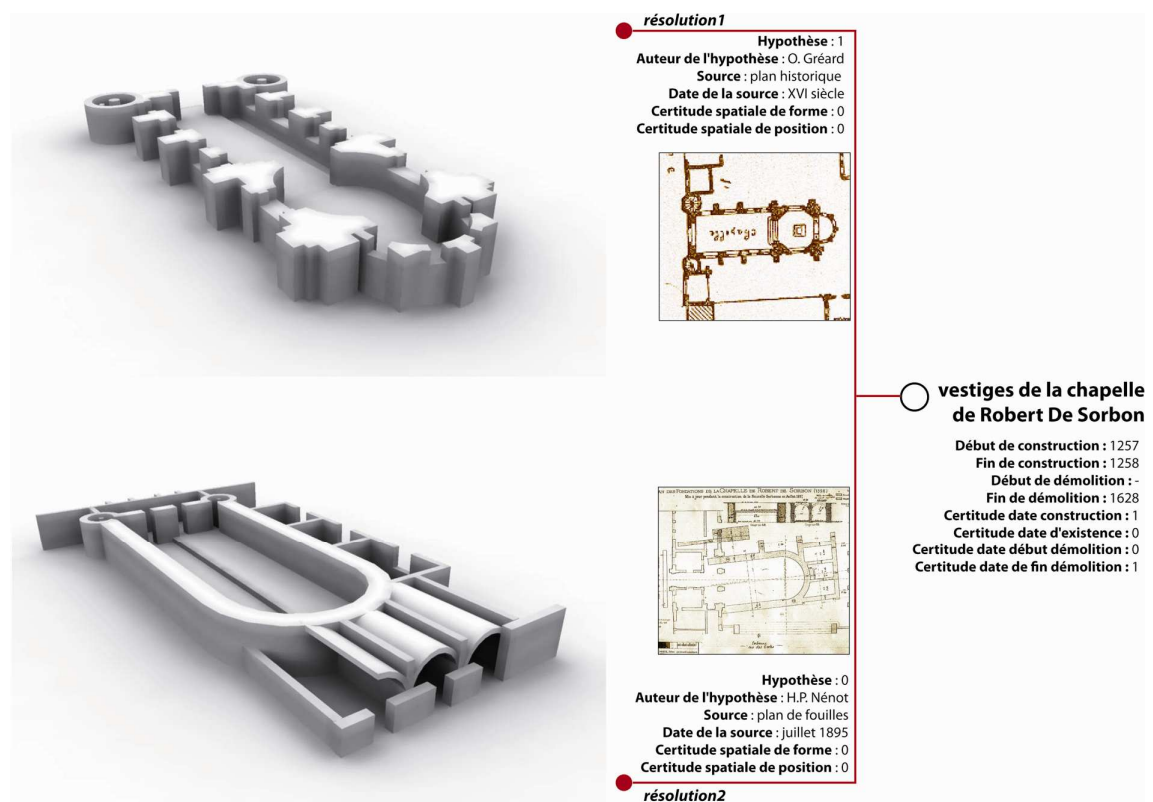


Figure 72. Représentation des vestiges de la Chapelle de R. De Sorbon à Paris. La première correspond à la restitution sur la base d'un plan historique du XVI^e siècle ; la deuxième est effectuée sur la base de la découverte des fondations pendant la reconstruction des édifices de la Cours de la Sorbonne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

7.2.4. Graphes historiques tridimensionnels

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

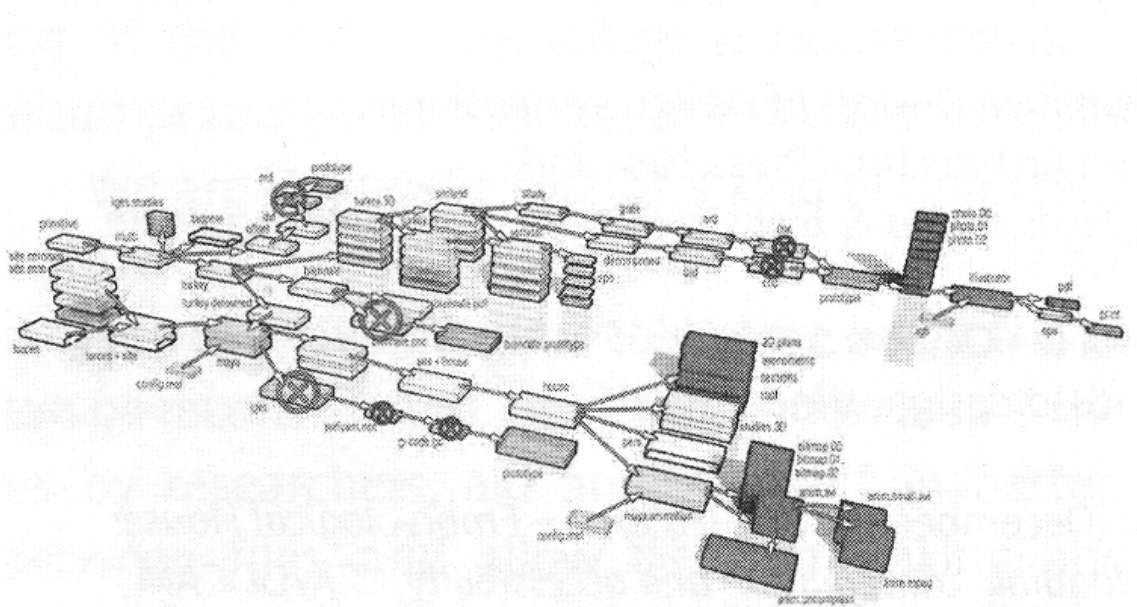


Figure 73. Reconstruction du processus de conception numérique de *l'Embryological House* de l'architecte Greg Lynn.

7.2.5. Domaines d'application

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

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

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

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

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

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

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

7.3. Réflexions conclusives

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

Bibliographie

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

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

Boden, M., 2006. *Mind As Machine: A History of Cognitive Science*, Clarendon Press.

Bonfatti, F. & Monari, P.D., 1994. Spatio-temporal Modeling of Complex Geographical Structures. Dans *Proceedings of the IFIP TC5/WG5.11 Working Conference on Computer Support for Environmental Impact Assessment*. North-Holland Publishing Co., pp. 49-60.

Breunig, B. et al., 2002. 5th AGILE Conference on Geographic Information Science. Dans *Geographic Information Science*. Palma (Mallorca), Spain, pp. 195-204.

Busayarat, C. et al., 2008. An on-line system to upload and retrieve architectural documents based on spatial referencing. Dans *IDMME - Virtual Concept 2008 Conference*. Beijing, China.

Bustany-Leca, C. & Bustany, D., 2005. Vers une vision du forum d'Auguste. Dans *Virtual Retrospect 2005*. Biarritz, France: Ausonius éditions, pp. 103-106.

Card, S.K., Mackinlay, J. & Schneiderman, B., 1999. *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*, San Francisco: Morgan Kaufmann.

Cariou, G., 2005. The three temples of the northwest end of the Roman Forum: Architectural Reconstruction and Topographic simulation. Dans *Virtual Retrospect 2005*. Biarritz, France: Ausonius éditions, pp. 96-101.

Carrozzino, M., Evangelista, C. & Bergamasco, M., 2009. The immersive time-machine: a virtual exploration of the history of Livorno. Dans *3D-ARCH 2009: "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures"*. Trento, Italy: Fabio Remondino, Sabry El-Hakim, Lorenzo Gonzo.

Cheyland, J., 2007. Les processus spatio-temporels : quelques notions et concepts préalables à leur représentation. *Mappemonde*, 87(3-2007), 1-21.

Chi, E.H. et al., 1998. Visualizing the evolution of Web ecologies. Dans *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. Los Angeles, California, United States: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 400-407.

Criminisi, A., Reid, I. & Zisserman, A., 2000. Single View Metrology. *Int. J. Comput. Vision*, 40(2), 123-148.

De Luca, L., 2006. *Relevé et multi-représentation du patrimoine architectural : définition d'une approche de reconstruction 3D d'édifices*. Engineering. ENSA Marseille. Available at: <http://www.map.archi.fr/ldl/publicationsFR>.

De Luca, L. et al., 2010. An Iconography-Based modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage. Dans *Proceedings of IEEE International Conference on Shape Modeling International*. Aix-en-Provence.

De Luca, L. et al., 2008. NUBES: une plateforme intégrée pur la description, l'analyse, la documentation et le partage de représentations numériques d'édifices architecturaux. Dans *Architecture et archives numériques. L'architecture à l'ère du numérique : un enjeu de mémoire*, Peyceré D, Wierre F.

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

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

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

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

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

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

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

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

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