

NUMÉRISATION 3D DU SITE DE SAINT-SYMÉON (SYRIE)

1. CONTEXTE

Le Massif Calcaire du Nord de la Syrie est à la fois une entité paysagère karstique très marquée et un conservatoire archéologique exceptionnel grâce à l'état des vestiges remontant à l'antiquité tardive et parmi lesquels le sanctuaire de Saint-Syméon fait figure de proue. Construit après la mort du premier stylite, survenue en 459, pour enchâsser la colonne de 16 m de haut sur laquelle le saint a vécu plusieurs décennies, le monument offre la particularité de conjuguer le dessin d'un grand projet impérial financé par l'empereur Léon, puis son successeur Zénon, et les techniques locales de construction très inventives fondées sur l'exploitation optimisée des matériaux abondants sur place: pierre, terre et bois d'œuvre.

L'analyse de l'architecture du monument est, conjointement à l'étude de la culture matérielle au temps du pèlerinage et à celle du paléoenvironnement, un objectif principal de recherche affiché par la mission, notamment auprès de la commission des fouilles du Ministère des affaires étrangères et de l'unité mixte de recherche Orient & Méditerranée qui soutiennent le projet. L'analyse des vestiges est conduite en trois phases successives d'échelle décroissante:

- Le relevé des structures en place;
- L'étude des éboulis;
- La fouille stratigraphique.

À Saint-Syméon, les murs ont été presque tous montés selon la technique fine et prisée du gros appareil orthogonal simple à joints vifs. Ils ont été par la suite disloqués ou effondrés par les séismes, fréquents dans cette partie du monde, à la charnière entre l'Afrique et l'Asie. Ils conservent les empreintes des éléments de second œuvre: trous d'encastrement de poutres, scellements, etc. qui permettent déjà, au seul examen des vestiges en élévation, d'émettre des hypothèses de restitution correspondant aux différentes phases d'utilisation. Il s'agit d'une architecture d'empilement où les fonctions statiques sont soulignées, en paroi extérieure, celle de présentation, par une modénature assez canonique dans la séquence des éléments de profil, ce qui permet des rapprochements chronologiques et géographiques, mais souvent fantaisiste dans les dimensions, les proportions et l'exécution des détails. Si les usages locaux privilégient pour le franchissement des portées l'architrave, le chantier de Saint-Syméon a vu fleurir la renaissance de formules plus sophistiquées d'archivoltes et de plate-bandes appareillées (Fig. 1).



Fig. 1 – Façade Nord de la basilique Nord du *martyrion* cruciforme de Saint-Syméon.

2. LES STRUCTURES EN PLACE

La mission archéologique française lancée sur ce site en 1980 sous la direction de Jean-Pierre Sodini a hérité d'une documentation graphique constituée essentiellement de plans réalisés entre les années 1935 et 1960. Les élévations du *martyrion* cruciforme ont fait l'objet dès la première campagne de relevés photogrammétriques aboutissant à la production d'une série de 24 planches à l'échelle de 1/20^e, complétées manuellement pour les parties cachées. Les conditions de prise de vue n'ont malheureusement pas permis d'atteindre l'exactitude attendue à cette échelle ni d'incorporer ces dessins dans un système géo-référencé, c'est à dire les rendre utilisables pour l'élaboration d'une maquette. Il s'est également avéré que les couples n'étaient pas ré-exploitable. Il a fallu admettre, à l'issue d'une mission réalisée en 2001 avec Yves Egels et Daniel Schelstraete de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), que la construction d'un système topométrique approprié était nécessaire. Cependant, grâce aux avancées technologiques de la photographie numérique, on pouvait immédiatement relancer une campagne de relevés photogrammétriques sans ignorer que la production des restitutions, à l'aide de l'application Poivillier E, durerait longtemps. Un programme général de topométrie du seul *martyrion* a été lancé en 2002 mais il a été difficile de résister à la tentation d'élargir le périmètre d'étude à l'ensemble du sanctuaire: monastère, baptistère et même l'arc triomphal qui se trouve dans le village, carrément à l'extérieur. Un en-

semble de points de référence a été déterminé progressivement entre 2003 et 2008. Les coordonnées X et Y ont été calculées dans un système en projection stéréographique centré sur un point du site, orienté sur le Nord astronomique, avec une échelle de distance correspondant aux mesures sur le terrain, et des altitudes fournies par rapport au niveau de la mer. Un outil de transformation permet de convertir des mesures entre le système WGS84, le système topographique syrien et le système Saint-Syméon. Les mesures topométriques ont été regroupées sur une base de données liée au dessin général du site.

En 2004, Yves Egels a proposé de compléter la photogrammétrie par des relevés au scanner 3D longue distance à différence de phase pour les volumes complexes, les absides et absidioles notamment. En dépit des difficultés locales multiples (pannes d'électricité, température ambiante élevée, etc.) et techniques (scan des cibles), la quasi-totalité du *martyrion* a pu être scannée au cours d'une mission de deux semaines à Pâques. Il a suffi d'une mission complémentaire en juillet pour achever la couverture totale de ce bâtiment et commencer le scan d'autres édifices du site. Dans le programme de la mission Saint-Syméon deuxième génération qui portait non seulement sur le sanctuaire mais l'ensemble du village, figurait en bonne place le plan de numérisation 3D des édifices majeurs grâce à la mise à disposition par l'unité mixte de recherche 3495, Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, de son expertise et de ses machines:

- 2007: baptistère, chapelle Sud et bâtiments attenants, secteur de l'arc triomphal (Julie Deléglise) dont la fouille est conduite par Dominique Pieri;
- 2008: mur d'enceinte et "Résidence" (Julie Deléglise et Micheline Kurdy);
- 2009: citernes, couvent du sanctuaire, couvent Sud-Est (Matthieu Dévaux, Micheline Kurdy, Lucien Morange, Jean-Baptiste Caverne);
- 2010: couvents Nord-Ouest et Sud-Ouest, église Nord (Micheline Kurdy, Mathieu Audern).

Les opérations de scanner et de topométrie étaient intimement liées. Le programme devait être complété en été 2011 avec une machine encore plus rapide et surtout dotée de batteries permettant une totale autonomie. Cette ultime série a dû être reportée à plus tard.

À partir de la somme des données métriques géoréférencées de l'ensemble bâti et de certains objets on a pu produire, grâce à l'outil Cumulus (Yves Egels), avec un degré élevé de précision, toutes les représentations en plan, coupes et élévations pour décrire l'existant et émettre des hypothèses sur les états antérieurs. Par ailleurs on a eu la possibilité, grâce à l'outil NUBES (Livio de Luca), de traiter:

- Le regroupement des nuages de points pour reconstituer les volumes selon des critères définis, chronologiques par exemple (Fig. 2);
- La réalisation d'animations de simulation;

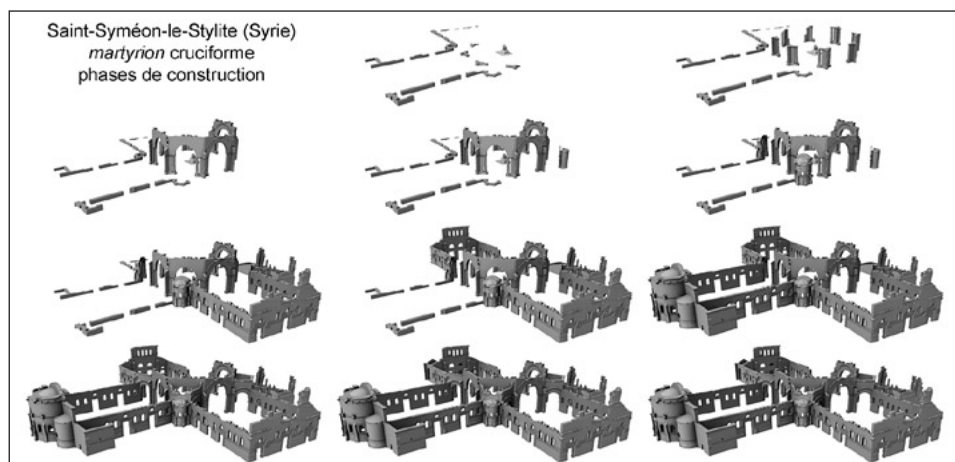


Fig. 2 – Maquette de l'état actuel du *martyrion* cruciforme de Saint-Syméon, étapes de la construction.

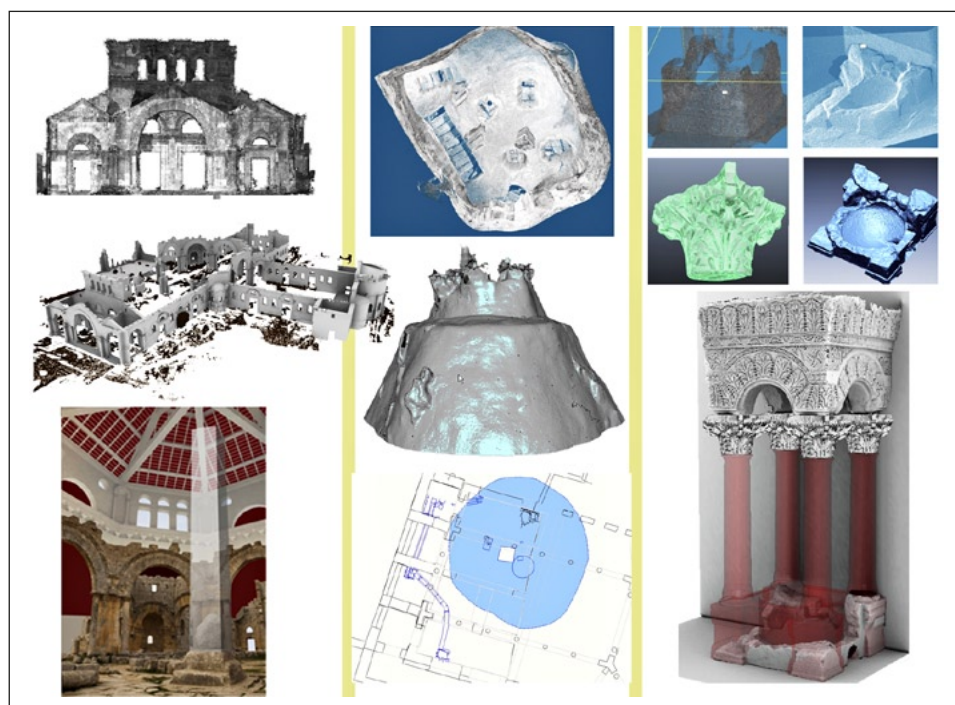


Fig. 3 – Schéma méthodologique, trois cas d'étude à des échelles diverses du site: *martyrion*, citernes et cuve baptismale.

- La représentation 3D des formes irrégulières (Fig. 3) (relevé et réalisation Matthieu Dévaux);
- La formalisation en 3D des unités stratigraphiques.

3. ÉTUDE DES BLOCS ERRANTS

Le *martyrion* cruciforme a été déblayé après la 2^e guerre mondiale. Avant d'être rangé en parkings, chaque bloc a été numéroté (gravé) et localisé dans sa position de chute sur des plans qui ont été conservés pour partie à l'Institut français d'archéologie de Beyrouth (actuel Institut Français du Proche-Orient) et pour l'autre au musée national d'Alep. Ils sont rangés à touche-touche et souvent difficiles d'accès. Pour le stock correspondant aux travaux d'après-guerre, plus de trois mille blocs ont été retrouvés et analysés. Près de deux mille ont été égarés ou réutilisés (en parement du mur d'enceinte notamment ou en remblai). Plus de deux mille ont été étudiés par la suite et déplacés par nos soins à l'Ouest de la basilique Ouest. Les blocs sont très souvent à l'état fragmentaire. On a constaté que, compte tenu des lacunes, très peu de sous-groupes de blocs sont directement assemblables. On a pu cependant les inventorier de manière à dénombrer des familles structurelles. Chaque bloc, dont on connaît ou on suppose en cas d'incertitude la position architectonique, est documenté dans les domaines suivants:

- Immatriculation (n°, place du n°, fragmentation, doublons);
- Dimensions de base;
- Description de formes complémentaires;
- Géolocalisation (lieu de chute, dépôt actuel, unité stratigraphique);
- Identification (fonction, structure);
- Documentation (bibliographie, iconographie, etc.).

Les blocs se trouvent très souvent en surface comme si les tremblements de terre les plus catastrophiques étaient survenus bien après l'abandon du site mais dans certains cas, comme celui qui a été rencontré aux thermes (chantier conduit par Pierre-Marie Blanc), une série de blocs éboulés a été sommairement rangée à terre à un niveau inférieur de la stratigraphie et est associée à une unité stratigraphique.

4. ANASTYLOSE

Le relevé des structures en place et l'étude des blocs à terre contribuent à l'anastylose numérique qui se conçoit globalement en volume.

Des requêtes sur des séries incomplètes de blocs à terre de l'octogone ont permis, grâce à la localisation des points de chute et des critères de sélection comme l'épaisseur et le type de décor, de proposer, avec un degré mesuré de

certitude, la restitution des parties manquantes pour le tambour octogonal du *martyrion* dans sa conception initiale.

La numérisation a permis d'assurer, pour les secteurs étudiés, la quasi-complétude de la documentation métrique des élévations conservées, de ne plus limiter les mesures à la préparation d'une série prédéfinie de coupes et élévations, d'intégrer tous les écarts et déformations par rapport aux formes idéales et de disposer en permanence du monument virtuel. Plus que la simple dématérialisation des supports documentaires, la numérisation des objets constitue un enrichissement qualitatif et quantitatif des mesures.

La mission de Saint-Syméon a largement bénéficié des coopérations formelles et informelles avec l'ENSG et le MAP qui se poursuivent maintenant pour le traitement des données amassées. Nous restons attachés à la conjugaison des recherches, archéologique et technologiques en matière de capture, d'archivage numérique et de représentation en architecture. La production de nuages de points par corrélation dense d'images devait être implémentée sur le site en 2011 au cours de la campagne qui a malheureusement dû être annulée.

L'interopérabilité des systèmes d'information graphiques progresse: les nuages de points géoréférencés peuvent maintenant être insérés dans les dessins vectoriels et servir d'appui à la création de volumes restitués. L'évolution rapide des outils de capture et de traitement engendre la création d'une multiplicité de formats de données dont on ignore la pérennité alors que la dématérialisation du fonds documentaire et l'anastylose numérique permettent de travailler dans l'espace virtuel, de conserver les vestiges dans leur authenticité et d'éviter des restaurations le plus souvent inopportunes.

Partant de simples "expériences en matière de relevés architecturaux et archéologiques", nous sommes passés à une phase industrielle du relevé 3D et c'est ce qui a conduit Micheline Kurdy à préparer une thèse sur les apports des outils numériques et le récolement d'informations archéologiques et architecturales en 3D.

Les études architecturales à Saint-Syméon sont menées en fonction de l'hétérogénéité du site. Diverses méthodes d'acquisition ont été appliquées sur chaque cas en tenant compte de différents facteurs. Jusqu'où les outils numériques deviennent-ils nécessaires et indispensables? Comment pouvons-nous bénéficier au maximum des possibilités qu'ils offrent pour la conservation, l'analyse et le partage des connaissances?

Cette présentation aborde tout d'abord la méthodologie de la reconstruction 3D basée sur le croisement des besoins archéologiques et les outils numériques. Elle a été appliquée à différentes parties du site et, notamment, sur un bâtiment particulier, la "Résidence", où une étude détaillée a été réalisée selon un processus complet: relevé, étude archéologique, reconstruction 3D et représentation informationnelle.

5. LA MÉTHODOLOGIE

La méthodologie a été appliquée sur les divers secteurs du site comme terrain d'expérimentation avec le support des outils numériques. L'objectif principal n'est pas la performance de visualisation, mais l'amélioration de l'analyse architecturale par l'application d'outils de visualisation 3D.

Dans le travail archéologique quelle que soit l'échelle de l'objet, un processus de plusieurs étapes s'impose. On a distingué quatre étapes principales et défini les relations entre elles, les différents outils numériques et les conditions:

- Le relevé architectural pour documenter, positionner et déterminer l'objet étudié;
- La modélisation tridimensionnelle virtuelle de l'état existant comme une base pour les études accompagnées d'enrichissements visuels;
- L'étude et les analyses de l'objet pour la réalisation virtuelle des réflexions et des hypothèses proposées;
- L'exploitation des données et leur présentation informationnelle, c'est l'objectif final et le résultat souhaité de l'étude.

Deux pôles ont un rôle important pour le choix de la stratégie: d'un côté les outils, leurs conditions d'utilisation et la relation entre les différentes étapes; de l'autre, les caractéristiques de l'objet et l'objectif de recherche. La morphologie de l'objet impose des conditions importantes dans la première étape, le relevé architectural. L'environnement de l'objet étudié conditionne également le relevé. L'objectif de l'étude influe sur le processus mené depuis le relevé jusqu'à la représentation finale. D'autres conditions générales aident à définir la méthode, comme la durée de l'acquisition, le contexte climatique, des conditions spéciales du site (politiques ou autres).

Dans une observation plus détaillée, nous pouvons classer les outils numériques en deux catégories principales: la photogrammétrie et la lasergrammétrie où chaque acquisition propose diverses techniques et applications. Elles se croisent tout au long du processus métier.

En appliquant notre méthodologie sur divers secteurs du site, une stratégie adaptée à chacun d'eux a été suivie. Trois cas, pris à des échelles différentes, illustrent la méthodologie (Fig. 3):

- La cuve baptismale pour l'étude des blocs sculptés, pour lesquels une campagne de relevés détaillés a été menée en 2008 avec un scanner de triangulation optique; une modélisation automatique a été faite à partir des nuages denses de points et une anastylose virtuelle a été proposée.
- Les citernes souterraines pour l'étude du système de récupération des eaux pluviales; une mission de relevés a été effectuée en 2009 avec un scanner à différences de phases pour obtenir des nuages de points détaillés, suivis d'une modélisation automatique en vue d'une étude comparative.

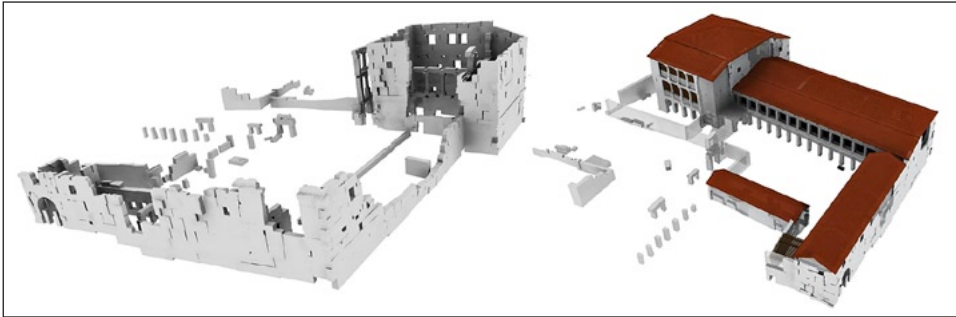


Fig. 4 – Maquettes de l'état actuel et de l'état restitué de la "Résidence".

– Le *martyrion* comme édifice majeur, étudié au cours de plusieurs campagnes; un scanner à temps de vols a permis un relevé complet du monument et une reconstruction géométrique a été réalisée selon la chronologie du chantier avec une restitution hypothétique des parties manquantes (Fig. 3).

6. PROCESSUS DE TRAVAIL SUR LA "RÉSIDENCE"

Basée sur les expériences précédentes, une étude approfondie a été conduite sur la "Résidence", édifice remarquable, situé dans le village de Télanissos (actuel Deir Sem'an) au Sud-Ouest du sanctuaire. Il s'agit d'un bâtiment civil du VI^e siècle, bien préservé, composé d'une entrée principale, d'une cour centrale et d'un complexe de bâtiments. En s'appuyant sur la méthodologie proposée, on présente une combinaison de plusieurs techniques et outils utilisés (Fig. 4).

6.1 Le relevé architectural

Pendant la campagne de 2008, une étude architecturale a été réalisée en se concentrant sur trois objectifs principaux:

- Collecte et rassemblement des informations métriques et sur les formes architecturales; un scanner de longue distance, avec un système de temps de vols, a été utilisé pour un relevé laser de la totalité du bâtiment restant. 250 millions de points ont été acquis et géo-référencés dans le système topographique de Saint-Syméon avec une résolution moyenne d'un point tous les 5 mm.
- Acquisition photographique, parallèlement, pour l'enrichissement visuel et l'aspect réel: des appareils photos numériques, 12 méga-pixels avec des lentilles (18 mm-70 mm), ont été utilisés pour couvrir la totalité des surfaces des parties en place de manière à les appliquer sur le modèle 3D et à compléter les lacunes présentées par les nuages de points.

– Acquisition photographique convergente pour photo-modéliser les blocs sculptés et les parties détruites.

6.2 *Reconstruction géométrique*

Toutes les données recueillies au cours des différentes enquêtes ont été utilisées pour une reconstruction générale tridimensionnelle. Un traitement spécifique a été expérimenté pour chaque type d'entité:

- Une reconstruction géométrique a été réalisée en s'appuyant sur les nuages de points, par modélisation selon la logique pierre-à-pierre afin d'obtenir une maquette détaillée de l'ensemble comprenant les déplacements de blocs et les fissures en guise d'étape préparatoire pour l'analyse et l'étude morphologique.
- La photo-modélisation a été utilisée pour restituer les blocs dispersés et les intégrer dans le modèle général en utilisant le géo-référencement des nuages.

6.3 *L'enrichissement virtuel*

Afin de donner un aspect réaliste au modèle 3D et de compléter les détails invisibles, une couche d'information photographique a été projetée sur le modèle 3D. Les photographies acquises ont été orientées cartographiées sur les surfaces.

6.4 *Analyse et étude*

La reconstruction géométrique a été le point de départ pour l'analyse et le développement de l'anastylose virtuelle. Cette étape a été basée sur trois points principaux:

- L'étude systématique de la maquette de l'état actuel; la morphologie du bâtiment, les déplacements et les parties manquantes;
- L'étude des sources documentaires recueillies à ce sujet;
- La comparaison des caractéristiques avec celles des bâtiments similaires dans la région.

Une restitution hypothétique de la "Résidence" a été réalisée: il s'agissait d'un complexe riche autour d'une cour centrale, avec un bâtiment principal à trois niveaux dont le rez-de-chaussée était affecté à la production de l'huile d'olive (reste d'une meule), un bâtiment à deux niveaux au Sud-Est, correspondant à une auberge, et une entrée monumentale avec écurie.

6.5 *L'exploitation de l'information et la représentation*

Afin de recueillir l'ensemble des données, collectées et produites, nous avons utilisé le système d'information NUBES, une plate-forme intégrée pour décrire, analyser, documenter et diffuser des représentations numériques d'édifices patrimoniaux.

Ce système, avec ses annotations sémantiques architecturales, s'utilise non seulement pour la conservation et la compréhension du patrimoine mais aussi comme outil d'archivage. Il fournit le support privilégié pour la navigation et l'interaction avec les sources documentaires utilisées pour la restitution hypothétique du bâtiment. Il forme en outre pour les spécialistes une interface commune et collaborative avec sa description sémantique pour le travail analytique au sein d'une scène 3D. L'interface est accessible aux multi-utilisateurs à la fois pour consolider la base de données et enrichir le projet.

Des informations de plusieurs types pourraient être associées au modèle 3D (dimensionnelles, morphologiques, historiques et descriptives) et rendues accessibles par le web aux professionnels et au grand public. Ce système d'information est constitué d'une application web à trois composants:

- Une base de données, développée en MySQL, pour organiser les données du relevé, les représentations multiples issues de la modélisation 3D et les sources documentaires (iconographie 2D);
- Une scène 3D interactive développée en Virtools DEV permettant le téléchargement, la visualisation et la manipulation des représentations en 3D;
- Un ensemble de pages PHP qui facilite l'accès de l'utilisateur aux informations stockées et fournit les passerelles nécessaires pour le dialogue entre la scène 3D et la base de données.

Ce système a permis d'établir le lien entre toutes les connaissances 3D, 2D et écrites. Il s'agit d'un outil interactif que les architectes et archéologues peuvent utiliser afin d'analyser, qualifier et partager des informations hétérogènes autour de l'étude de la morphologie du bâtiment (Fig. 4).

7. CONCLUSION

L'accent a été mis sur une approche analytique de diverses méthodes d'application dans différents cas d'étude, par un processus dynamique et conçu pour des multi-utilisateurs. L'objectif était de souligner le rôle des outils numériques et des techniques qui peuvent affecter tous les aspects des travaux archéologiques: relevés architecturaux, modélisation géométrique, restitution hypothétique et exploitation d'informations.

Nous avons abordé les limites et les perspectives. Les limites sont liées au très grand nombre de données que collectent les différentes techniques d'acquisition et qui rendent complexe la vision d'ensemble du site. La structuration sémantique permet de donner une réponse et de réaliser une représentation géométrique et architectonique du site. L'expérience tentée sur la "Résidence" concerne une partie restreinte du site. L'application de la méthode sur d'autres secteurs devrait permettre d'homogénéiser l'information sur la totalité du site.

Dans une perspective à plus long terme, elle pourrait être progressivement appliquée sur des sites similaires.

JEAN-LUC BISCOP
UMR 8167, Orient & Méditerranée, Paris

MICHELINE KURDY
UMR 3495, Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine, Marseille

ABSTRACT

Despite the damage caused by earthquakes, the ruins of the Sanctuary of Saint-Syméon (Syria) still stand proudly in the landscape and constitute the distinct but complementary phases of the archaeological study of the monument. The French Archaeological Mission of Saint-Syméon-le-Stylite, carried out by the CNRS-UMR 8167 Orient et Méditerranée and largely funded by the Ministry of Foreign and European Affairs, has been committed to the 3D rendering of architectural drawings starting in the early 2000s, thanks to a partnership with the École Nationale des Sciences Géographiques. The 3D data acquired over the years give us an important platform on which to apply a working protocol established in the case of La Résidence, a civilian building in the village of Télanissos. A wide range of techniques was applied and used to create a digital model as a support for the navigation and the interactive management of documentary sources that have facilitated a hypothetical reconstruction of the building. The NUBES information system has been used to describe, analyse, document and share digital representations of this building. The main contribution of this work is the combination of archaeological assumptions with documentation methods, in a dynamic and multi-user perspective.