

Numérisation, restitution et visualisation en 3D de sites patrimoniaux

■ Jonathan CHEMLA

Iconem agit dans les zones où le patrimoine est menacé afin de réaliser rapidement un modèle numérique photo-réaliste d'un monument ou d'un site archéologique, en couplant l'utilisation des drones, de la photogrammétrie et des scanners laser. Ce modèle 3D sert d'archive pour la diffusion et l'étude, mais aussi de base à un certain nombre de traitements utiles pour les architectes, les restaurateurs du patrimoine et les scientifiques. Après avoir opéré au Proche-Orient – sur la vieille ville de Mossoul ou le Crac des Chevaliers pour Unesco – ses missions récentes ont couvert des sites en France comme le Mont-Saint-Michel, en Europe, en Afrique du Nord ou encore en Asie du Sud-Est.

MOTS-CLÉS

Scan 3D, archéologie de sauvegarde, photogrammétrie, documentation du patrimoine, numérisation multi-échelle

C'est dans ce contexte d'archéologie de sauvegarde, dans le cadre de missions pour lesquelles l'accès au terrain est complexe et nécessite une intervention rapide qu'Iconem a été amenée à créer des solutions technologiques afin de collecter une documentation précise et complète. La grande partie de nos interventions repose sur l'utilisation de la photogrammétrie drone et sol, rapide à déployer et présentant moins de contraintes logistiques que d'autres techniques, ainsi que la capacité à combiner des acquisitions à différents niveaux de résolutions et d'étendue. Les relevés LiDAR présentent des caractéristiques complémentaires aux relevés photogrammétriques et sont sur certains chantiers très adaptés. La photogrammétrie aérienne est un outil efficace pour la couverture de surfaces étendues, le relevé de zones difficiles d'accès ou impraticables, ou de zones inaccessibles pour des raisons de sécurité. Une voilure fixe permet des vols à une centaine de mètres du sol pour des résolutions de l'ordre de 10 cm, des multi-rotors, plus maniables, permettent

Contexte, technologies et missions

Iconem a été créée en 2013 pour répondre à la problématique de la sauvegarde et de la diffusion de la mémoire des sites et du patrimoine mondial. Apporter une réponse à la disparition accélérée de traces de notre histoire sous l'effet de causes naturelles et humaines, enregistrer l'état d'un site ou monument à un moment dans le temps, et diffuser cette documentation, en extraire de l'information et la soumettre à l'analyse des profes-

sionnels sont autant de missions dans lesquelles l'équipe s'investit.

Les menaces qui pèsent sur l'intégrité des sites sont chaque jour plus présentes. Les catastrophes naturelles – érosion, inondations, séismes – comme les dégradations causées par l'homme, brutales – pillage, conflits et destructions idéologiques – ou liées au développement – urbanisation, expansion urbaine, massification du tourisme et exploitation de ressources naturelles et minérales – ont un impact direct sur la préservation des sites.

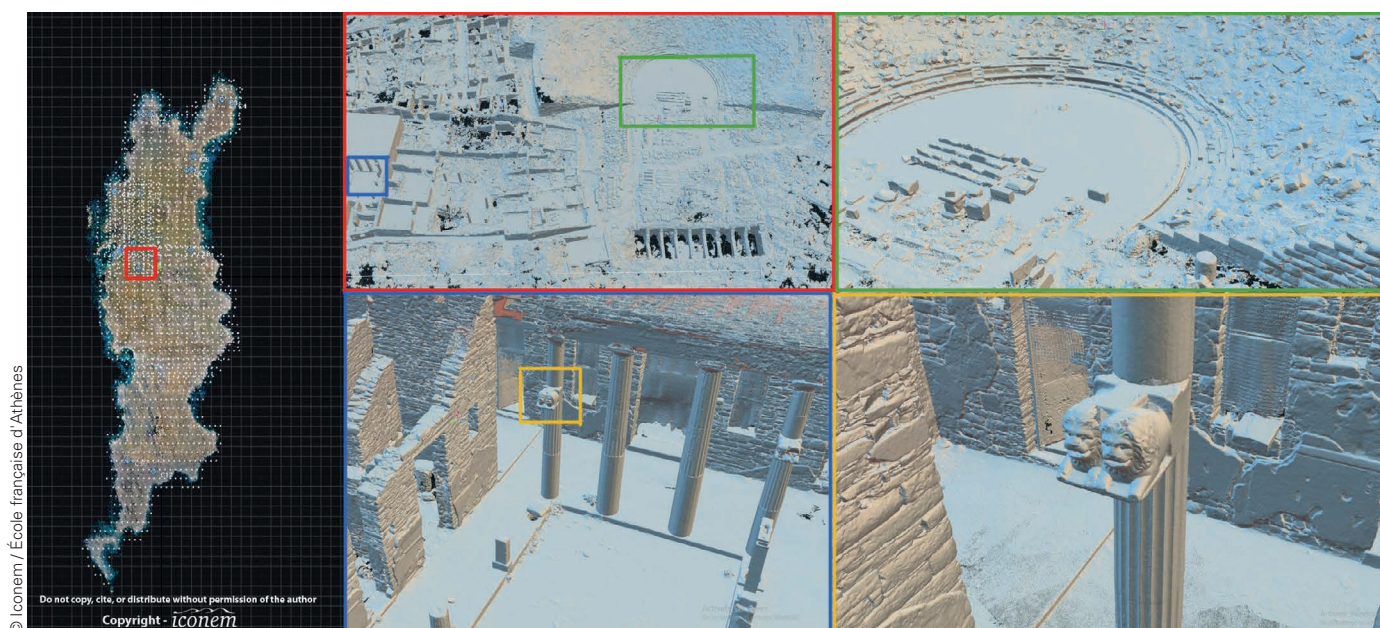


Figure 1. Relevé multi-résolutions réalisé sur l'île grecque de Delos



l'acquisition d'architecture pour des résolutions de l'ordre du centimètre et sont complétées par des acquisitions sol pour des résolutions du millimètre. Combiner ces différentes échelles d'acquisition permet de réaliser des scans 3D à la fois très résolus et couvrant de larges étendues, sur des temps d'acquisition réduits. Afin de simplifier l'accès à ces reconstructions 3D massives, l'interaction avec la donnée, sa visualisation et son traitement sont aujourd'hui centralisés sur une base de données collective, une plateforme web ouverte issue de la recherche et développement d'Iconem. Au-delà de l'archivage et de l'analyse, la médiation, la mise en valeur du patrimoine et la participation sont autant de vecteurs explorés qui permettent d'accélérer la documentation de ces sites, d'éveiller les publics à ces menaces, de mobiliser les différents pouvoirs publics et accéder aux sphères décisionnelles pour mener des politiques à l'échelle mondiale en collaboration avec les instances internationales et les acteurs locaux.

La *figure 1* présente un exemple de relevé multi-résolutions réalisé sur l'île grecque de Delos, avec une couverture à l'aile volante à gauche, à 10 cm de résolution sur l'intégralité de l'île de 4 km de long, complétée de survols au multi-rotor sur la totalité des structures excavées, à 2 cm de résolution, comme le montre le quartier du théâtre en haut. Une majorité de ces structures a également été couverte grâce

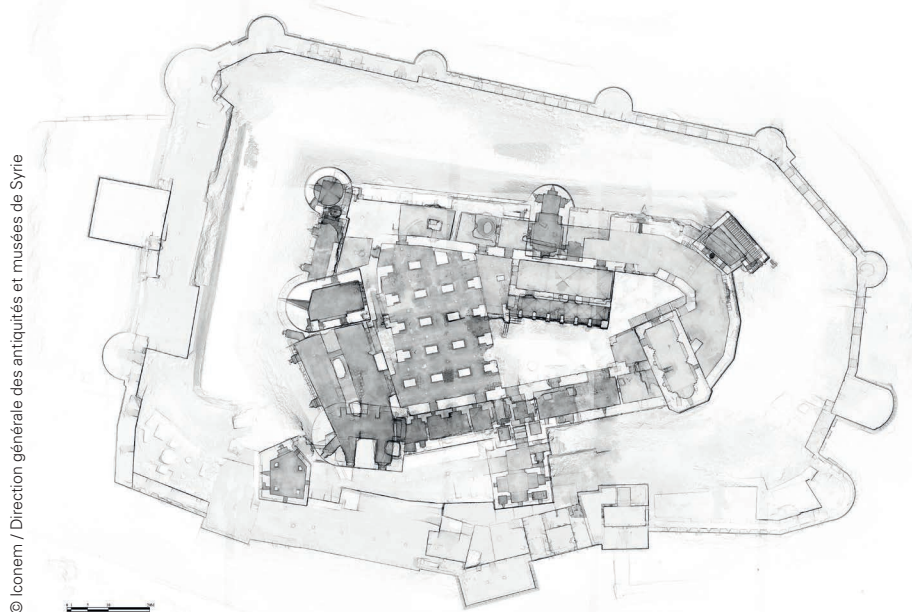
à un relevé photogrammétrique sol, qui présente une résolution de 1 mm, visible sur les détails de la villa du trident en bas de l'image. Concevoir les techniques permettant de réaliser des reconstructions 3D sur des jeux de données toujours plus importants – de quelques milliers d'images par site en moyenne en 2015 et une centaine de Go par mission à environ 50 000 images par site en 2018, pour environ 4 To par mission type – permet également d'accélérer le traitement d'un nombre de sites toujours plus important. C'est le cas du projet *Syrian Heritage*, initié par Iconem, à la base d'un projet de documentation systématique d'un grand nombre de sites du patrimoine d'un pays. A fin 2019, Iconem a couvert environ 150 sites dans une trentaine de pays.

Utiliser ces relevés 3D comme base de travail des professionnels, archéologues ou restaurateurs ne peut se faire sans un accès facilité à ces volumes de données importants – des modèles 3D de plusieurs milliards de points en général, difficiles à manipuler sans des ressources matérielles spécifiques et des connaissances dédiées. Enregistrer cette donnée sur une plateforme SIG web rend possible un accès centralisé pour les professionnels et autorités locales, simplifie la manipulation et l'extraction de valeur, et rend surtout possible une spatialisation de l'information. Le modèle 3D peut servir à agréger l'intégralité de la documentation iconographique acquise sur un site

au fil des années, repositionnée dans l'espace virtuel à un moment dans le temps. Contextualiser ces archives dans ce référentiel 3D simplifie l'accès par le temps et l'espace, pour mettre en valeur l'histoire proche ou ancienne d'un site, permettre la comparaison de différents états d'un site et de ses restaurations. Cela simplifie aussi la possibilité pour les professionnels formés de contribuer eux-mêmes à ces travaux de documentation, afin de créer une base de données collective et ouverte, basée sur des technologies open-source, qui devrait être proposée au début de l'année prochaine.

Exemples concrets, missions d'urgence

A l'origine, la majeure partie des actions d'Iconem s'est déroulée sur des sites au Proche-Orient – Syrie, Irak, Afghanistan entre autres – sur lesquels les menaces qui pesaient sur le patrimoine étaient les plus immédiates, et du fait de connexions avec des archéologues sur le terrain dans ces pays. Le premier travail réalisé sur le Crac des Chevaliers, par exemple, a été mené à distance, suite à la formation d'archéologues locaux qui avaient accès au site, car nos équipes n'avaient pas pu obtenir les autorisations idoines pour se rendre sur le site. Suite à ces premières reconstructions mi-2014, une première mission terrain sur fonds propres a pu être réalisée fin 2015, suivie d'une mission en partenariat avec l'Unesco afin de capter l'intégralité de la citadelle, intérieurs compris, mi-2017. Ce modèle – le premier relevé de l'intégralité du monument avec des techniques actuelles, réalisé à l'aide de 60 000 photos, pour une résolution spatiale de 2 mm – a ensuite servi de



© Iconem / Direction générale des antiquités et musées de Syrie



Figure 2. Le Crac des Chevaliers



Figure 3. Mosquée Al Nuri à Mossoul

base à une étude précise des pathologies subies au cours du conflit et à un inventaire détaillé des dégâts superficiels – impacts de balles – ou plus profonds – destructions dues à des tirs de mortier. La figure 2 permet de voir également le tracé, étage par étage, de la forteresse, et des différentes salles qui la composent. Un rendu en perspective tiré du nuage de points est également présenté et permet d'apprécier la finesse du modèle 3D – chaque pixel de l'image est un point du nuage projeté en perspective. D'autres numérisations d'urgence ont été réalisées à Alep ou encore Palmyre, en avril 2016, quelques jours après le départ des troupes de l'État Islamique. Un déploiement rapide sur le terrain nous a permis en 5 jours sur place de réaliser une cartographie de l'intégralité du site de Palmyre, rendant également possible le repositionnement dans l'espace des restitutions réalisées grâce à des documents d'archives des années 1930 de Robert Amy. Des simulations ont également pu être réalisées grâce à ces restitutions pierre-à-pierre, afin d'étudier la dynamique de la destruction de ces monuments.

En Iraq, une analyse du pillage a pu être menée sur des sites situés sur des territoires contrôlés par l'Etat Islamique, en particulier Khorsabad fin 2015, Nimrud mi 2016, grâce à des drones longue distance. Ces drones, lancés depuis le front avec le Kurdistan irakien, ont pu parcourir 25 km avant d'arriver sur site réaliser la prise de photos, à environ 300 m d'altitude. En comparant ces relevés avec des imageries satellite, moins précises, un catalogue des zones sur lesquelles les pillages étaient localisés a pu être établi. Plus récemment, dans le cadre du projet de restauration de Mossoul mené par l'Unesco, Iconem a



été amené à réaliser une cartographie de l'intégralité de la vieille ville de 4 km² à 3 centimètres de résolution mi-2018. Certaines zones d'intérêt pour l'étude des restaurateurs du patrimoine, – la mosquée Al Nuri (figure 3) ou l'église Al Tahira par exemple – ont également été couvertes à 2 mm de résolution. Cette cartographie a servi de base à une importante étude des dommages subis par le cœur historique de Mossoul, afin d'analyser quels étaient les zones et quartiers les plus impactés par le conflit, quel était l'état de dégradation des différentes unités d'habitation et monuments ainsi que leur importance historique figure 3. Un modèle numérique d'élévation a également pu être fourni à partir du modèle de surface, pour accompagner le travail des restaurateurs du patrimoine, en complément de ces cartes vectorielles.

En Afghanistan, un des projets les plus récents concerne le minaret de Jam, pour lesquels des travaux de consolidation avaient été réalisés par une

équipe de restaurateurs missionnée par l'Unesco pour empêcher son inclinaison – de plus en plus importante en raison des crues de la rivière qui le longe. Une étude du minaret a été menée à partir de cette représentation numérique, pour évaluer l'inclinaison et la comparer aux années précédentes et réaliser des plans détaillés des structures. Un escalier en double spirale permet d'accéder aux étages supérieurs, visible sur les sections et tracés en figure 4. Les équipes scientifiques peuvent par ailleurs manipuler cette donnée d'où qu'elles soient sur la planète, quand les contraintes sécuritaires sur le site, proche d'une zone sous contrôle taliban, ne rendaient possibles des campagnes archéologiques courtes que de manière très irrégulière.

Des projets en dehors de la région du Proche-Orient sont aujourd'hui de plus en plus nombreux. Après avoir travaillé sur des sites en Europe, comme Pompei, Delos ou Aphrodisias, certains sites en Asie du Sud-Est

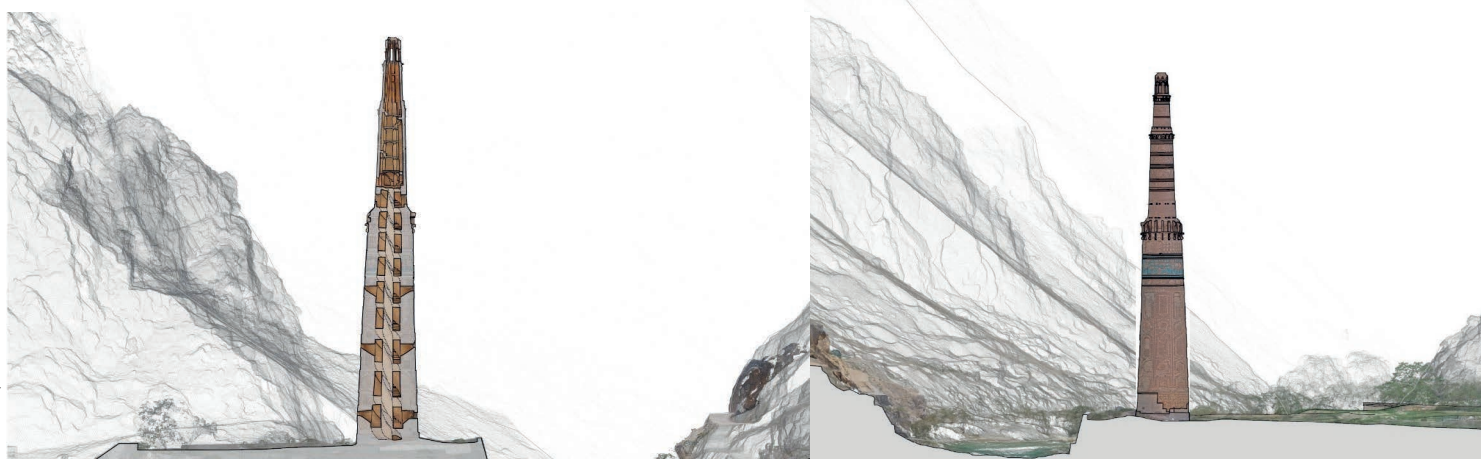


Figure 4. Le minaret de Jam

(l'Inde avec le tombeau d'Humayun ou Hyderabad, le Cambodge avec Angkor Wat) et en Afrique du Nord (les pyramides d'Égypte, du plateau de Gizeh à Meïdoun ou Dahchour, la Libye avec Leptis Magna ou Cyrène) ont été reconstruits en 3D. Iconem est de plus très présent en France, après avoir réalisé de nombreux projets avec la ville de Paris pour des équipes d'architectes restaurateurs du patrimoine, comme sur l'église de la Trinité (*cf. première de couverture*) ou la tour Saint-Jacques. Le Mont-Saint-Michel (*figure 5*) est l'un des projets les plus complexes réalisés sur le territoire français, avec aux alentours de 50 000 images acquises au drone et depuis le sol, une couverture complète du monument, intérieur et extérieur.

Enfin, si à l'origine, la plupart des projets menés par Iconem était réalisé dans le cadre de missions archéologiques et de relevés de monuments historiques, lors de projets de recherches ou de restauration et valorisation du patrimoine – en relation directe avec les équipes terrain – une part de plus en plus importante de projets a aussi été réalisée pour le

compte de grandes instances internationales comme l'Unesco ou la Banque mondiale, ou sur des fonds levés par des grandes fondations dans le secteur culturel comme l'AKTC (*Aga Khan Trust for Culture*) ou *Turquoise Mountain*.

Des projets menés par des ministères de la Culture de différents pays, ou des réseaux publics et maillages comme celui des Écoles françaises qui promeuvent la collaboration entre des équipes de recherche de différents pays sont également source de travaux importants. Une proportion de plus en plus importante de notre activité concerne aussi aujourd'hui un travail de médiation et valorisation de ce patrimoine, ces sites et ces monuments, à travers la création d'expositions numériques immersives donnant matérialité à ces données 3D. Ces expositions rendent possible l'immersion d'un public dans ces sites distants, parfois inaccessibles ou endommagés, et ancrent d'autant plus fortement un discours, la narration d'un message dans la mémoire du visiteur. Par la mise en matière de ces données numériques,

les musées donnent à voir des sites du patrimoine, plus seulement par l'intermédiaire d'objets archéologiques ou d'une documentation iconographique, mais à travers l'immersion dans les sites eux-mêmes, ce qui renforce le souvenir. Des expositions de ce type ont par exemple été inaugurées au Grand Palais fin 2016, à l'Institut du monde arabe fin 2018 ou au Musée des arts islamiques de Doha. Des documentaires s'appuient également sur ces données pour recréer des parcours qu'il est impossible de réaliser par le biais de prises de vues réelles, afin de retracer l'inscription d'un site dans son paysage naturel, de focaliser le regard du visiteur sur certains éléments accompagnant la narration. ●

Contact

Jonathan CHEMLA, Iconem
jchemla@iconem.com

ABSTRACT

Iconem develops solutions to digitize sites and monuments where they are the most threatened, creating photo-realistic 3D models by coupling the use of drones with photogrammetry or terrestrial laser scanner. These digital copies are useful for surveying, archiving and diffusion, and also serve as a base model for all kinds of processing useful to architects, restorators and scientists. Iconem most recent missions include surveys on Mosul or the Crac des Chevaliers for Unesco, as well as sites in France (for example the Mont Saint-Michel) and Europe, North Africa or South-East Asia.

Figure 5. Mont-Saint-Michel

