

# Cultural Heritage at Risk

## CONGRÈS UNESCO PARIS 23 & 24 SEPTEMBRE 1999

Transmettre la forme à la postérité et prévenir les risques majeurs.  
Numérisation des volumes et simulation informatique

Benoit Coignard

En l'an 2000, le célèbre "Code d'Hammurabi" sera prêté par la France pour être exposé à Tokyo. Cette même année, l'Égypte souhaite ériger à Alexandrie la statue colossale de Ptolémée II restaurée l'an passé à Paris et de retour au pays. Ces deux événements culturels mettent ces œuvres prestigieuses en situation de risque en cas de séisme dans ces régions sensibles. Nous avons été à plusieurs reprises confrontés à cette situation pour d'autres œuvres restaurées dans un passé récent. Ce fut en particulier le cas de l'installation de la statue colossale et morcelée de "l'Empereur Auguste" à Arles, une région de notre pays qui connaît une menace latente; et plus récemment de la présentation à Tokyo de l'exposition "Angkor, dix siècles d'art Khmer" dont les grandes divinités debout et les célèbres frontons de Banteay Srei étaient sans doute les plus vulnérables. Les mesures préventives entreprises en collaboration avec les responsables japonais nous semblaient cependant insuffisantes pour ne pas dire dérisoires. Indépendamment d'un éventuel tremblement de terre, la manipulation répétée d'œuvres particulièrement fragiles au cours de leur long périple de Phnom Penh à Osaka en passant par Paris et Washington engageait notre responsabilité collective. Que dire alors d'un accident d'avion qui aurait englouti en un instant les œuvres majeures de la statuaire khmer. En réponse aux diverses menaces envisagées, nous avons été amenés à élaborer deux stratégies parallèles : la numérisation préventive et la simulation du risque.

Au XIXe siècle, Viollet le Duc a entrepris une grande campagne de moulage des fleurons de la sculpture française réunis dans un but pédagogique au musée des Monuments français. Après deux guerres mondiales et un siècle de pollution sans précédent, ces reproductions sont parfois devenues meilleurs témoins de la qualité des œuvres et de la sensibilité des artistes que les originaux eux-mêmes. La restauration est une lutte sans fin contre inéluctable disparition des formes et nous devons trop souvent encore faire aveu d'impuissance. Depuis dix ans déjà, nous utilisons des technologies de numérisation de volumes pour mouler sans contact des œuvres sculptées et éventuellement les reproduire. L'innocuité de la technique permet de prendre l'emprunte fidèle des œuvres les plus fragiles (1), ou de sauver la forme de reliefs pulvérulents avant une tentative de consolidation (maladies de la pierre, bois gorgés d'eau, etc.). L'écrasement d'un visage lors de la chute d'une statue demeure irrémédiable pour l'intégrité de l'original, mais elle n'est plus irréparable. La possibilité de "téléporter" et de reproduire à distance les œuvres numérisées ouvre des perspectives pour l'étude et l'enseignement sans déplacement donc sans risque pour les originaux

(2). C'est un atout pour l'industrie culturelle (tourisme virtuel, commerce de reproductions produites à distance) susceptible de générer dans l'avenir des fonds pour la conservation du patrimoine. Enfin, face aux risques naturels majeurs, aux ravages "collatéraux" de conflits armés, voir à la volonté délibérée de détruire la mémoire d'une culture ennemie, la conservation de "clones" numériques du patrimoine tridimensionnel dans différents lieux du monde est l'ultime parade à la destruction totale des originaux. L'existence même des techniques de numérisation des volumes nous crée le devoir d'en faire usage pour fixer l'état de notre héritage et garantir sa transmission à la postérité. C'est un acte de conservation préventive qui concerne autant la sculpture que l'architecture. Sur la base d'une carte des risques naturels, une priorité serait donnée aux sites et aux œuvres sujettes à des menaces certaines et inévitables en l'état actuel de nos connaissances (glissement de terrain p. ex.) pour entreprendre des campagnes de numérisation systématiques.

Capteurs 3D et logiciels de modélisation arrivent peu à peu à maturité. Leur usage tend à se répandre. Les fichiers de forme sont donc destinés à faire partie intégrante de la documentation normale des œuvres tridimensionnelles dans les inventaires des collections et de l'architecture. Mais au delà de la simple conservation de la forme, les clones numériques ouvrent des perspectives nouvelles pour la connaissance de la statique des œuvres d'art et la prévention des risques. Une nouvelle discipline apparaît que nous appelons l'Infosculpture. Notre objectif est de développer des assistants informatiques à la restauration de sculpture. Plusieurs expériences ont démontré par des résultats pratiques l'utilité de leur application à des cas de figures fréquemment rencontrés par le restaurateur, l'archéologue et le conservateur. Il est ainsi possible de simuler informatiquement à partir du modèle mathématique d'un volume complexe, certains actes de restauration : expérimenter virtuellement le réassemblage d'œuvres fragmentées de volume important ou dont les fragments sont distants (3) ; évaluer des projets d'intervention, sur des œuvres de grandes tailles notamment, et définir leur mise en œuvre par des calculs d'ingénierie fondés sur des mesures exactes ; nous mesurons par exemple, la projection verticale des centres de gravité ; cet axe tracé à la surface des blocs déterminera la position optimale d'un goujon (absence d'effort en torsion) et donc sa section minimale utile ; à la jonction de blocs érodés ou lacunaires se définit la volumétrie précise d'une prothèse qu'il est possible de produire numériquement ; il en est de même des structures porteuses, des socles et des caisses. Cette méthode, a été appliquée à la restauration de la statue colossale de "l'Empereur Auguste" du musée d'Arles en 94/95 et, plus récemment au "Colosse d'Alexandrie".

Mais les actes simulables sont aujourd'hui limités aux fonctions prévues par les logiciels employés (nous utilisons principalement le scanner/logiciel Soisic/Ipsos). Détournés de leur vocation industrielle, ils ne sont pas toujours adaptés à nos applications particulières. Les progrès peuvent venir de voies distinctes : du développement de modules dédiés à des fonctions spécifiques (collage

virtuel par analyse du degré de similitude et attraction magnétique, outils de réglage des surfaces, modélisation de prothèses, algorithmes de simplification des formes concaves pour tailler des emballages "en dépouille" dans des blocs au négatif de l'œuvre) ; de l'importation de modèle de sculptures numérisées dans d'autres logiciels (modeleur pour la restitution des lacunes

p. ex.). Une nouvelle génération de logiciel permet d'explorer par un maillage interne la distribution des forces dans un volume. C'est le cas du logiciel CASTEM 2000 du laboratoire d'étude de mécanique sismique du CEA. On peut donc réunir dans un même outil d'analyse, le modèle numérique de la géométrie d'une statue, les données relatives à l'étude du ou des matériaux constitutifs de l'œuvre (densité, résistance à la compression, etc.) et de ses prothèses (nature et forme des inserts et supports métalliques, caractéristiques des résines, etc) ou encore, des données internes d'une œuvre anciennement restaurée (ou présentant en surface des fissures, des zones friables et autres fragilités, etc.). Celles-ci seraient alors cartographiées en trois dimensions par tomographie à rayons X (4) ou Gamma (hétérogénéité du matériau, failles, collages et inserts anciens, etc.) et associées aux autres données connues.

L'intégration dans un unique modèle de structure, des données scientifiques issues de technologies complémentaires permettrait d'étudier en profondeur la statique d'œuvres complexes. Le Colosse d'Alexandrie par exemple est fait de 4 blocs de granit montés sans collage sur un socle métallique et une assise en béton moulée à la pierre ; les blocs sont maintenus par une potence en acier ; des goujons et des semelles en inox s'interposent entre les blocs et un moulage en résine assure l'intimité du contact. De la possibilité d'effectuer sur le modèle mathématique de cette structure complexe des calculs d'élasticité linéaire et non-linéaire, de thermique, de mécanique de la rupture, seront déduits les efforts subis par les matériaux et les seuils critiques de résistance. Les logiciels développés dans l'industrie aéronautique pourraient quant à eux mesurer, compte tenu de l'aérodynamisme de la forme, les efforts à subir en cas de tempête par la statue de Ptolémée II qui sera réinstallée dans l'illustre cité maritime. L'exploration d'un modèle aussi complet que possible dans divers outils d'analyse présente un intérêt considérable pour prévoir le comportement des œuvres dans des situations de risques et pour prévenir leurs effets par des mesures appropriées. Que les risques appartiennent à la vie courante (vents, manutention, vibrations lors d'un transport couché, incidence des fixations en cas de chocs accidentels) ou à des situations exceptionnelles importe peu. La connaissance approfondie de la mécanique structurelle des œuvres engendrera d'importants progrès tant pour la conception des interventions de restauration qu'en matière de prévention des risques majeurs. Les progrès peuvent enfin venir de la mise en commun de l'expérience acquise par différentes équipes. En Italie récemment, la modélisation effectuée en CAO sur les voûtes de la basilique d'Assise après séisme (pour comprendre les mécanismes physiques qui ont conduit à leur effondrement, puis pour concevoir et mettre en place des équipements préventifs) a démontré la pertinence

de cette approche et l'intérêt de l'entreprendre en amont d'une catastrophe. Cependant, bien des œuvres architecturales ont des géométries gauches qui résistent à la modélisation en CAO. Le scanner que nous utilisons, bien adapté aux dimensions monumentales résoudrait sans aucun doute cette difficulté pour le patrimoine ancien et l'architecture traditionnelle.

Et pour finir sur une bonne nouvelle, nous avons récemment conçu un socle antisismique qui est l'objet d'un brevet en cours. Le prototype donne empiriquement des résultats convaincants, mais sa confrontation avec la variété des phénomènes sismiques réels pose évidemment des problèmes pratiques. De même son efficacité dépend de son adaptation à chaque sculpture particulière. Nous espérons entreprendre prochainement son évaluation méthodique en collaboration avec le Laboratoire d'étude de mécanique sismique du CEA sur les installations TAMARIS. Les tables vibrantes soumettront les prototypes de socle et des maquettes d'œuvre (voir des reproductions numériques à l'échelle 1/3) à une variété représentative de signaux sismiques de synthèse. Les essais doivent permettre de mettre au point le procédé sur des exemples précis et de mesurer pour chaque type de mouvement les fréquences absorbées et les fréquences résiduelles transmises à l'objet. Il conviendra ensuite de créer un modèle théorique pour adapter le principe de socle à chaque cas de figure. Nous espérons être prêts pour un rendez-vous significatif : l'érection de la statue Ptolémée II à Alexandrie. Que cette ancienne victime du séisme qui engloutit le phare, signale un espoir concret pour faire face aux catastrophes à venir.

Benoit Coignard - Infosculpteur  
Conservateur-restaurateur de sculpture  
attaché au Service de restauration des musées de France

#### Notes

(1) Trop fragile pour être moulé, le Dieu guerrier gaulois de St Maur a été expérimentalement numérisé et reproduit en stéréolithographie en 89/90 dans le cadre du programme Camille (M.Dalbéra, service de la recherche et de la technologie du Ministère de la culture), avec F.Schmit du Laboratoire de France Télécom et J.C.André du CNRS de Nancy.

En 98, le "Champollion" de Bartholdi dont l'original, conservé au musée de Grenoble, s'avérait trop fragile pour être moulé par d'autres procédés, a été scanné et reproduit grandeur nature par le procédé Lom (2,40m de hauteur soit 24000 couches de papier découpées et superposées).

(2) En avril 97, pour symboliser le thème de la réunion du G7 de Bonn (Commerce électronique et droit d'auteur), "le Centaure" de Roland Coignard a été téléporté via internet depuis la France jusqu'en Allemagne où il a été reproduit en stéréolithographie puis en bronze et offert au Président du G7 lors des cérémonies de clôture.

L'opération "G7 Centaur" a servi à démontrer la faisabilité du commerce électronique sécurisé d'une œuvre d'art 3D. Elle est le point de départ du projet Coseppa (serveur coopératif pour la promotion des arts plastiques), financé par la Commission Européenne et soutenu par L'Unesco. Il a pour objectif "de préserver la diversité des expressions artistiques et des cultures sur le marché mondial" en garantissant "le libre accès de tous les artistes à la diffusion de leurs œuvres dans le respect de leur droit" (congrès mondial sur la recommandation relative à la condition de l'artiste ; Unesco - Paris - juin 98).

Cette même année, la numérisation et la reproduction à l'échelle 1/3 du Harihara de Phnom Penh et d'une tête de Bouddha du musée d'Arts Asiatiques Guimet avaient pour but l'édition de reproductions d'art transcendant l'échelle originale. Elles sont commercialisées par la Réunion des Musées Nationaux. La vente via internet de reproductions réalisées à distance pourrait contribuer au financement de campagnes de numérisation préventive, l'acquéreur devenant donateur dans des opérations médiatisées.

(3) La statue colossale de l'Empereur Auguste du musée d'Arles est constituée d'un torse en marbre et d'un drapé en calcaire brisé en dix fragments. L'appartenance mutuelle des deux parties à la même statue n'étant pas rigoureusement établie, nous avons procédé en 94/95 à la numérisation de chaque morceau et à leur réassemblage virtuel, puis à l'étude statique du modèle pour la conception du socle. La ville d'Arles étant située dans une zone sismique sensible le projet de présentation a été analysé et avalisé par un sismologue.

En octobre 97, le "Colosse d'Alexandrie" a été numérisé en Egypte en vue de sa restauration. L'érosion des blocs après leur long séjour sous marin dans la baie d'Alexandrie leur donnait une forme de galet difficile à associer dans une position exacte par la manipulation des parties en position couchée. L'anastylose de la statue de Ptolémée a été effectuée à Paris avant l'arrivée en France de la statue. La position des inserts métalliques a été déterminée par les axes projetés des centres de gravité reportés précisément pour le percement des blocs de granit. Les semelles intermédiaires, le socle et l'assise, la structure porteuse et les surfaces soumises aux effets du vent ont été en grande partie formalisés à partir du modèle mathématique.

(4) En 97, une statuette de forme très complexe, l'Elan de Sandrine Coignard, a été modélisée par tomographie à rayon X avec M. Camille Schliter à l'Institut français de pétrole. Avec ce procédé, les creux prononcés n'échappent pas à la saisie comme c'est le cas avec des scanners optiques (zones d'ombre). La modélisation 3D du contenu de la statuette - les couches de collage, les fissures, la présence d'un goujon et de zones restituées par des ragréages - s'est avérée expérimentalement réalisable. De plus l'hétérogénéité du matériau (il s'agissait ici d'un plâtre coulé en plusieurs étapes de densité variable) est fort bien visualisée. L'information très nuancée qui en résulte doit permettre une analyse fine des fragilités de l'œuvre, de

prévoir les conséquences de l'application de forces, et de concevoir l'intervention de restauration, les actes prévus étant à leur tour étudiés en simulation de risques. Les informations issues de la tomographie 3D sont sans aucun doute les plus complètes que l'on puisse attendre à une exception près : la dimension du voxel (plus petite unité de volume décrit par ce procédé) est sensiblement plus grande donc moins précise que l'information issue d'une numérisation de la surface par laser/vidéo (triangulation active). Un moulage par tomographie a donc une moins bonne définition.