

# MISE EN VALEUR DES SCULPTURES FRAGMENTAIRES EN MATÉRIAUX PIERREUX, EN CONTEXTE MUSÉAL : LA PHOTOGRAMMÉTRIE COMME OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION

HÉLÈNE COLLOMB, ANAÏS LECHAT

**Résumé** L'étude qui va suivre est une réflexion sur le montage des œuvres sculptées instables sur leur support et destinées à être présentées en contexte muséal. Les sculptures de grandes dimensions, fragmentaires et lacunaires, retiennent particulièrement notre attention, car elles posent des problèmes de stabilité et de mécanique. Nous avons mis en place un protocole d'analyse et de conception du montage d'une sculpture en travaillant de manière interdisciplinaire : avec un restaurateur de sculptures, un ingénieur spécialisé dans l'imagerie 3D et une étudiante ingénieur en mécanique et matériaux.

En particulier, nous verrons comment l'outil photogrammétrique est utilisé pour l'étude structurale de la sculpture afin de déterminer les matériaux à utiliser pour sa restauration. La démarche interdisciplinaire menée ici a permis la création d'une note proposée pour aider le restaurateur de sculptures à rédiger un cahier des charges à l'intention de l'ingénieur. Les différentes étapes du rapport d'ingénierie sur l'étude mécanique d'une sculpture y sont développées.

## Restaurer une sculpture fragmentaire et lacunaire

Avant d'entreprendre un traitement de conservation-restauration, un protocole d'analyse et de conception du montage d'une sculpture fragmentaire est indispensable. Afin d'illustrer la démarche, voyons le cas du réassemblage d'une sculpture brisée : l'Atlante d'Apamée de Syrie, une sculpture romaine datant du II<sup>e</sup> siècle après J.-C. Il s'agit d'un haut-relief en calcaire, conservé aux musées royaux d'Art et d'Histoire de Bruxelles (Belgique).

À la suite d'un incendie la sculpture s'est cassée en de nombreux fragments; elle fut ensuite conservée dans cet état dans les réserves du musée. Elle est entrée dans l'atelier de restauration des sculptures de l'ENSAV La Cambre en 2014, pour y bénéficier d'une étude<sup>1</sup>. et d'un traitement de conservation-restauration. Les photographies (**fig. 1**) présentent l'état de la sculpture et ses multiples fragments à son arrivée à l'atelier, avant intervention.

---

<sup>1</sup> Étude réalisée dans le cadre d'un mémoire présenté en vue de l'obtention du master en Conservation-restauration des Œuvres d'art, spécialité sculpture / ENSAV La Cambre / Bruxelles, année académique 2014-2015 (Lechat, 2015).



**Figure 1** État de quelques fragments avant restauration. ©Anaïs Lechat.

L'Atlante constitue un beau défi technique de montage d'une sculpture non seulement fragmentaire mais aussi très lacunaire et donc très instable sur son support.

Nos questions sont les suivantes : comment assembler les fragments entre eux, et comment assembler la sculpture à son support dans le musée? Ceci, en respectant au mieux l'intégrité de la matière de l'œuvre.

Nous sommes face à plusieurs difficultés :

- le poids : les fragments pèsent entre 30 et 314 kg. L'ensemble des fragments pèse environ 550 kg;
- la manipulation : pour des raisons de conservation et afin d'éviter l'affaiblissement des plans de cassure, il est préférable de limiter les manipulations des fragments.

Visualiser le rendu final après assemblage n'est donc pas chose aisée et il s'avère difficile d'anticiper les risques de manière globale. En tenant compte de tous ces aspects, notre volonté est d'optimiser le choix des matériaux pour la restauration et le montage de la sculpture.

## L'intérêt de l'outil numérique et de la photogrammétrie

Afin d'étudier la sculpture, Stéphane Jupin, spécialiste de l'image et service 3D<sup>2</sup>, s'est associé au projet en proposant l'outil photogrammétrique pour réaliser un modèle 3D de l'Atlante. Ce procédé consiste à créer un scan de chaque fragment sous plusieurs angles de vue et de construire ensuite un modèle 3D par corrélation dense d'images numériques.

La photogrammétrie présente de nombreux intérêts pour la conservation-restauration des sculptures :

- préserver l'information de l'œuvre photographiée à un moment donné de son histoire;
- enrichir le contenu d'une étude préalable;
- donner trace de l'œuvre avant traitement, puis après traitement;
- éviter de mouler la sculpture, et donc d'utiliser des agents de démoulage;

<sup>2</sup> Laboratoire de recherche, de conservation et de restauration du patrimoine archéologique mobilier, Arc'Antique, Nantes.

- réaliser des socles sur mesure pour soutenir de manière uniforme la sculpture;
- réaliser des armatures internes sur mesure dans la masse sculptée.

Dans le cas de l'Atlante d'Apamée, l'ingénieur a réalisé une étude structurelle<sup>3</sup> à partir de ces modèles numériques. Sur la base du protocole et des matériaux proposés par le restaurateur, ces choix ont été optimisés et améliorés par l'ingénieur. Les éléments du montage ont tous été vérifiés : le collage des fragments, la structure métallique et le socle. Nous avons également évalué les contraintes appliquées sur ces éléments, ce qui permet d'anticiper les risques, de visualiser les cas limites et d'optimiser le choix des matériaux.

Grâce aux logiciels photogrammétriques<sup>4</sup>, nous pouvons manipuler et visualiser numériquement tous les fragments, ainsi que le volume de la sculpture une fois réassemblée. En pratique, à l'atelier de restauration nous avons limité ainsi la manipulation des fragments.

Ces méthodes numériques ont permis de mieux appréhender les forces mécaniques qui s'exercent sur la sculpture : la résistance à la compression de la pierre, la résistance à la traction des inserts métalliques et des colles.

À partir du modèle 3D de l'Atlante, l'ingénieur a étudié les interfaces de collage des fragments : leur état de surface et leur inclinaison. Ainsi, les couches de colle ont été étudiées selon l'étendue de la surface à coller, le poids des fragments les surmontant et leur angle d'inclinaison. Cette contrainte équivalente est comparée ensuite à la limite d'élasticité des différentes colles envisagées par le restaurateur, multipliée par un facteur de sécurité.

L'étude structurelle a été effectuée en considérant la sculpture en situation stable (muséale) mais aussi en situation transitoire, en tenant compte des vibrations provoquées par des travaux ponctuels, ou encore des vibrations (chocs) rencontrés lors d'un transport. Les ingénieurs ont conçu numériquement le modèle de la semelle qui vient maintenir la sculpture verticalement. Il est techniquement possible d'imprimer cette semelle en trois dimensions.

En outre, la modélisation a permis à nos collaborateurs et ingénieurs d'étudier et de vérifier les différents éléments du montage, et de dialoguer sur la base d'un même support visuel.

## Répondre aux principes déontologiques de réversibilité des matériaux

Cette démarche interdisciplinaire s'est avérée très enrichissante pour notre pratique de restaurateur. Les calculs de résistances des matériaux ont permis de faire les choix les plus appropriés pour le cas spécifique de l'Atlante.

Dans le domaine de la restauration des œuvres sculptées de grandes dimensions, il n'est pas rare d'utiliser des moyens irréversibles et très interventionnistes. Citons simplement l'utilisation de résines thermodurcissables et la réalisation de percements pour permettre un goujonage. Notre volonté était de restaurer l'Atlante en respectant au mieux la matière de l'œuvre. Ainsi, pour assembler les fragments entre eux, nous n'avons pas réalisé de goujonage. L'utilisation d'une résine acrylique thermoplastique, le Paraloid B48-N, s'est en effet avérée suffisante. C'est après des tests en atelier et après vérification des propriétés de l'adhésif appliqué à la sculpture que nous l'avons utilisé sur les plans de cassure de l'Atlante<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Étude structurelle complète en annexe du mémoire (Lechat, 2015).

<sup>4</sup> Logiciels Meshlab et CloudCompare.

<sup>5</sup> Paraloid B48-N à 50 % dans l'acétate d'éthyle. Choix réalisé à partir de tests en atelier et des études de G. Corti (2014) et J. Down (2015).

D'une part, l'emploi de cette résine est beaucoup plus confortable que celui d'une résine de type époxy (choix de la concentration en résine et choix du solvant de mise en œuvre en fonction du temps de travail et du substrat à coller). D'autre part, nous avons ainsi évité l'utilisation d'une résine thermodurcissable irréversible, ce qui est une avancée très encourageante. Grâce à cette étude préalable très complète, le travail pratique de restauration s'est effectué sereinement. L'assemblage des fragments entre eux et la réalisation d'une semelle ont été réalisés par le restaurateur. La structure métallique a, quant à elle, été effectuée par un socleur métallier<sup>6</sup>.

Cette collaboration a permis de mettre en évidence l'intérêt de fédérer les compétences, de s'ouvrir à de nouveaux outils et d'avoir un langage commun pour que les différents spécialistes puissent entreprendre un traitement de conservation-restauration cohérent.

## **Mode opératoire d'évaluation d'un rapport d'ingénierie aidant à la restauration d'éléments statuaire brisés**

Cette note propose au restaurateur une méthode afin de rédiger un cahier des charges à l'attention de l'ingénieur et d'évaluer les résultats fournis par ce dernier. Cette méthode s'applique dans le cas d'une étude prévisionnelle des matériaux de restauration d'éléments statuaire cassés.

### **Cahier des charges : que peut demander le restaurateur ?**

- Production d'un modèle 3D de chacun des fragments.
- Production d'un modèle 3D de la sculpture réassemblée.
- Vérification du choix des matériaux d'assemblage (résistance des colles, tiges métalliques, structures métalliques...).
- Vérification de la résistance de la sculpture à restaurer et de son socle après remontage et restauration.
- Évaluation de la nécessité ou non d'inclure des goujons entre les fragments.
- Aide au soclage : production d'un modèle 3D virtuel de semelle permettant le maintien vertical de la sculpture; étude du matériau dans lequel on peut la réaliser.
- Dimensionnement de l'armature métallique envisagée pour tenir la sculpture (éviter le surdimensionnement).
- Etude dynamique de l'ensemble : dans quelles conditions doit-on transporter ou exposer la sculpture réassemblée ?

### **Documents à fournir à l'ingénieur**

- Contexte général de la restauration et objectifs précis (conditions de restauration / transport / exposition au public).
- Photographies de tous les fragments avec les dimensions notables inscrites (longueur / épaisseur / largeur).
- Poids des fragments.

<sup>6</sup> Pascal Marchand, chef de l'équipe technique des musées royaux d'Art et d'Histoire de Bruxelles.

- Matériau(x) des éléments statuaire (indication sur l'état de conservation de la sculpture, pour notamment statuer sur l'iso-densité et l'homogénéité ou non des fragments et pouvoir effectuer par la suite des calculs barycentriques).
- Plan de restauration (éléments de restauration envisagés : goujons, armature métallique, colle, socle... matériaux envisagés accompagnés de leur fiche technique précise avec notamment les caractéristiques mécaniques)
- Fiche technique des produits que le restaurateur envisage d'utiliser.

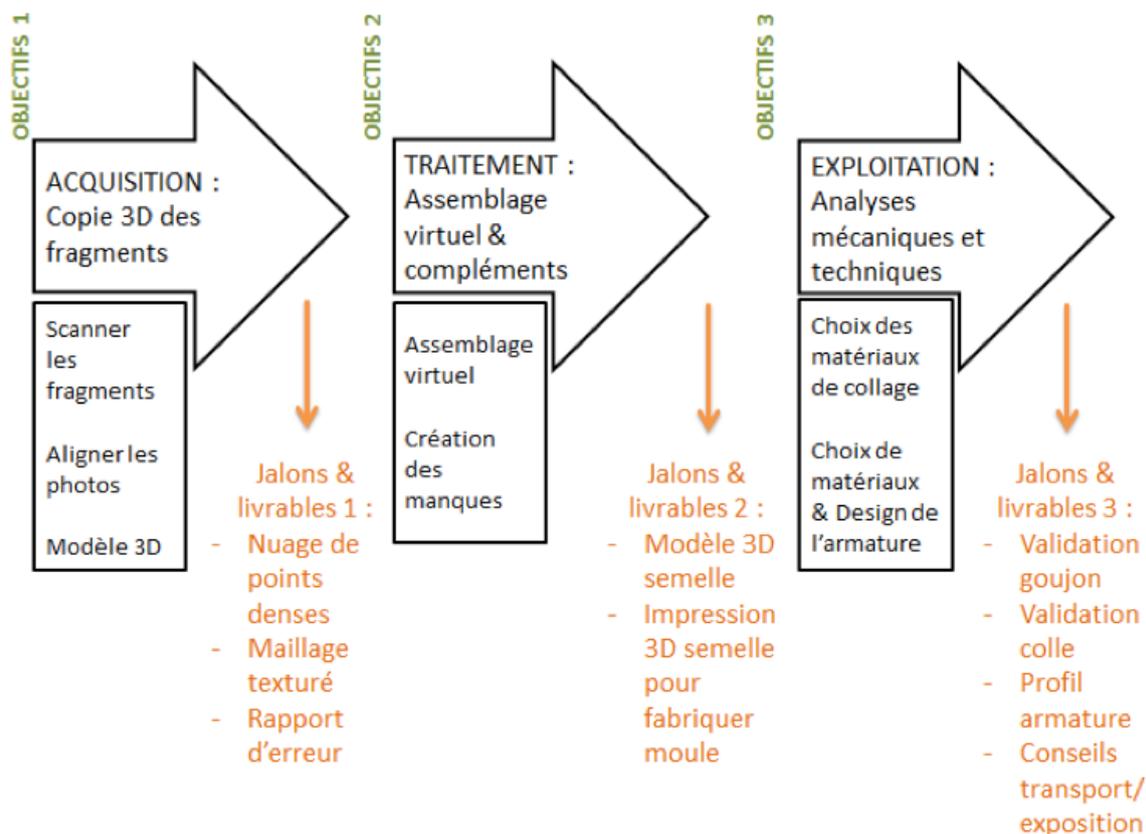


Figure 2 Étapes du rapport d'ingénierie sur l'étude mécanique par photogrammétrie. ©Anaïs Lechat.

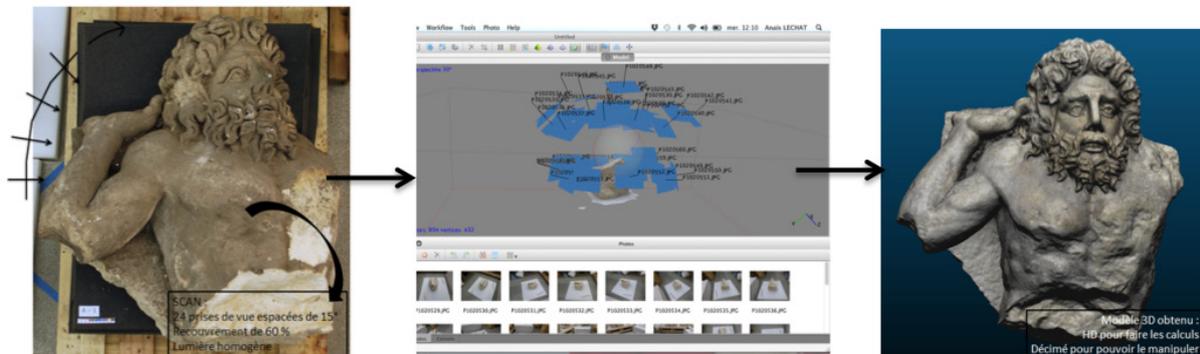
## Mode opératoire permettant la compréhension et l'évaluation du rapport d'ingénierie

Les différents objectifs, les trois grandes étapes ainsi que les jalons de l'étude mécanique sont détaillés ci-dessous.

### Première étape : copie 3D précise de chacun des éléments statuaire

- Pouvoir manipuler virtuellement les éléments statuaire sans avoir à les déplacer en atelier.
- Avoir une trace de l'aspect des éléments statuaire avant restauration.

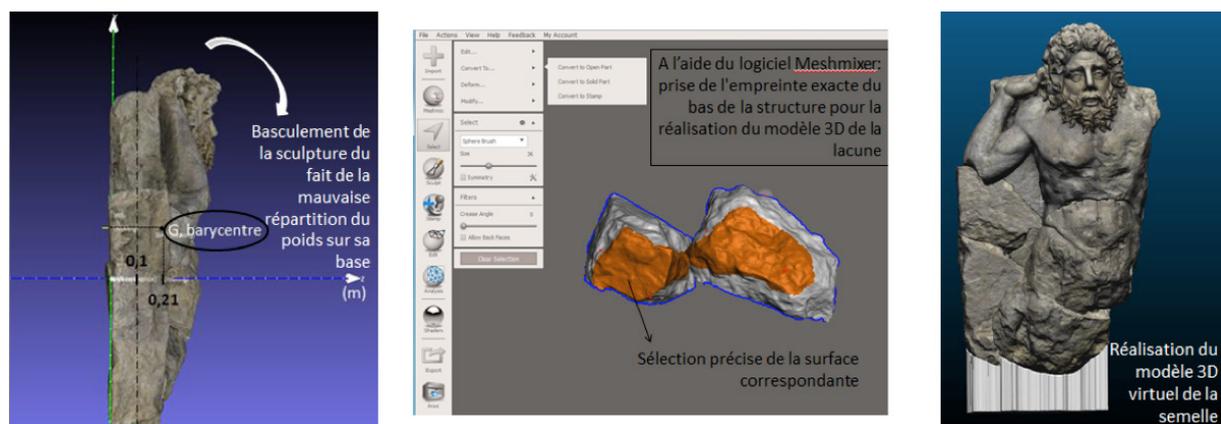
- Avoir un modèle 3D<sup>7</sup> sur lequel faire des mesures précises servant aux calculs postérieurs d'ingénierie (géométrie exacte des fragments pour une meilleure précision des calculs).



**Figure 3** Prise photographique des fragments / numérisation des fragments / modélisation 3D.  
©Anaïs Lechat.

### Deuxième étape : reconstitution 3D de la sculpture

- Repérer la place dans l'espace et le positionnement des fragments entre eux.
- Anticiper les dispositifs nécessaires à la restauration : collage, calages, armature métallique.
- Évaluation des lacunes, proposition d'une semelle pour assurer la stabilité de l'ensemble (**fig. 4**).
- Evaluer l'importance du travail à effectuer (taille des manques).
- Préciser le positionnement des lacunes qui peut influencer le choix du matériau de comblement (poids à supporter, porte-à-faux...).



**Figure 4** Calculs possibles à partir des logiciels photogrammétriques : calculs du barycentre / prise d'empreinte numérique / réalisation du modèle virtuel de la semelle. ©Anaïs Lechat.

<sup>7</sup> Logiciel utilisé : CloudCompare.

### Troisième étape : le choix des matériaux

- Choisir les matériaux pour le collage des fragments en fonction du poids des éléments surplombant l'interface à coller (contrainte de compression) et de l'angle d'adhésion (contrainte de cisaillement) (fig. 5).
- Evaluer la nécessité de goujonner, déterminer l'emplacement et les dimensions du goujon.
- Choisir le matériau du support qui résistera aux forces exercées par la bascule naturelle de la sculpture.
- Définir les zones de renfort nécessaires.
- Déterminer la forme et la taille des attaches métalliques et des poutres de retenue.
- Avoir un plan dimensionné de l'ensemble de l'armature, pour obtenir un modèle précis à présenter au technicien qui la réalisera (fig. 6).
- Anticiper les risques potentiels après restauration et lors de la mise en place de l'armature.

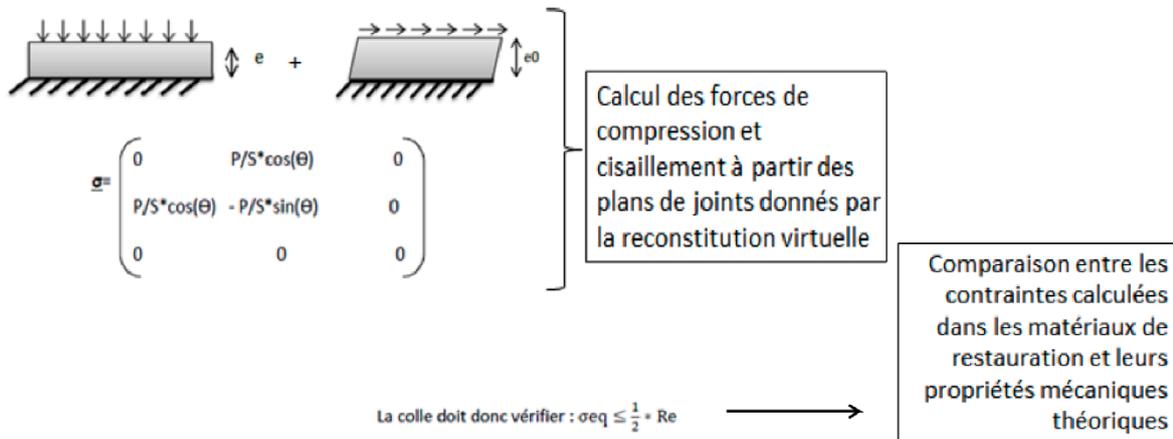


Figure 5 Calculs en vue de choisir l'adhésif le plus adapté au collage des fragments. ©Anaïs Lechat.

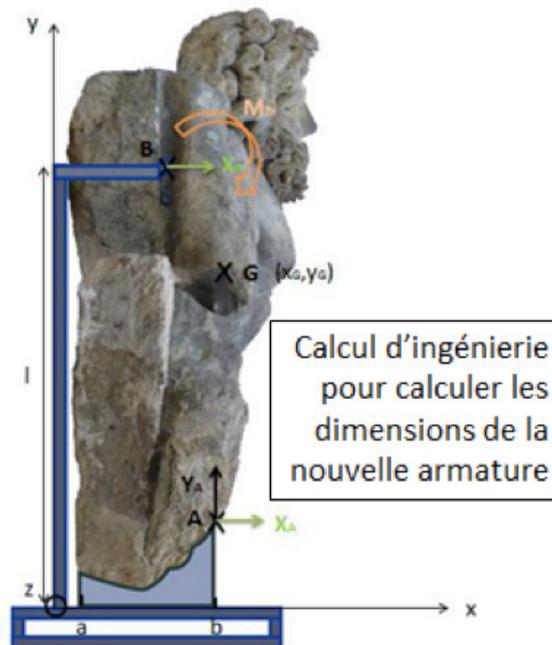
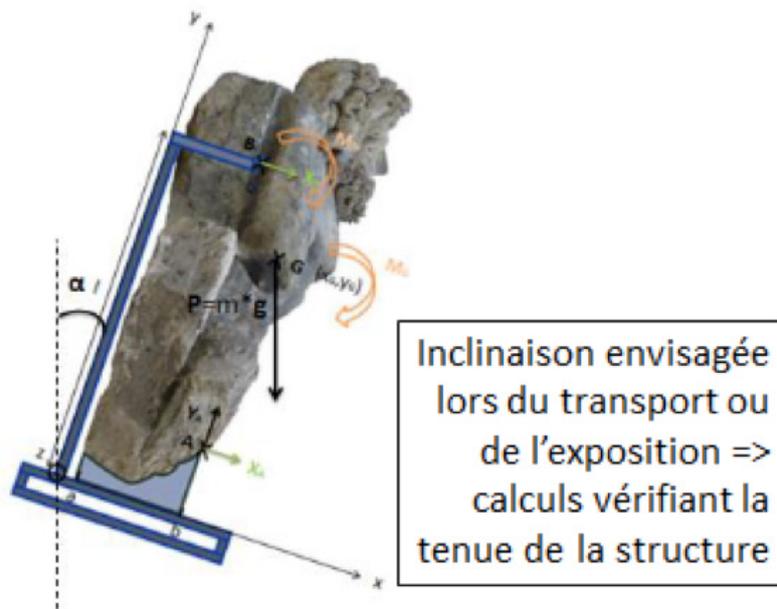


Figure 6 Simulation des dimensionnements de l'armature métallique. ©Anaïs Lechat.

- Vérification de la résistance du profil métallique retenant la sculpture (**fig. 7**).
- Prévoir les détériorations possibles de ce type de structure, souvent lourdes et encombrantes.
- Transmettre les consignes précises pour les manipulations, le stockage, le transport et l'exposition au public.



**Figure 7** Évaluation des matériaux en situation transitoire.  
©Anais Lechat.

## Conclusion

L'étude mécanique réalisée avec les méthodes photogrammétriques nous a permis de valider le choix des matériaux et d'étudier les cas limites. ©©L'ingénieur travaillant à partir d'une géométrie précise de la sculpture, nous pouvons ainsi comprendre les enjeux mécaniques du montage de la sculpture et anticiper les risques. Nous prenons ainsi les dispositions optimales pour assurer la conservation de la sculpture et la sécurité des visiteurs du musée.

La photogrammétrie a participé à une meilleure communication entre les différents intervenants en charge de la sculpture. Le travail interdisciplinaire s'est révélé créateur d'innovations techniques et notre volonté est de poursuivre à l'avenir cette démarche professionnelle. Nous espérons que cette expérience pourra aider le restaurateur à mieux formuler sa demande auprès d'un ingénieur. Il est important également qu'un restaurateur puisse évaluer le rapport d'ingénierie, qu'il en comprenne les résultats et qu'il exprime un avis critique.

## Références bibliographiques

- Berger O., Piffaut C., Billard V.** (2007), « Le soclage des œuvres en pierre, entre l'éthique et l'esthétique », *CORÉ - Conservation et restauration du patrimoine culturel*, n° 18, p. 14-17.
- Berger O., Piffaut C., Tamborero L.** (2006), « Conservation-restauration des biens culturels, Archéologie sous-marine et œuvres lapidaires sculptées monumentales : quand la conservation préventive passe par la présentation au public », dans *Mesures et analyses, regards croisés des conservateurs-restaurateurs et scientifiques, Méthodes actuelles de consolidation*, actes des XXII<sup>es</sup> Journées des restaurateurs en archéologie (Toulouse, 12 et 13 octobre 2006), Paris, ARAAFU, (coll. Conservation-restauration des biens culturels - Cahier technique, 16), p. 58-66.
- Cognard P.** (2002), *Collage des matériaux-mécanismes. Classification des colles*, Ed. Techniques de l'ingénieur.
- Corti G.** (2014), « Modelling the failure mechanisms of Michelangelo's David through small-scale centrifuge experiments », *Journal of Cultural Heritage*, n° 16, p. 26-31.
- Down Jane L.** (2015), « The evaluation of selected poly(vinyl acetate) and acrylic adhesives : a final research update », *Studies In Conservation*, Vol. 60, n° 1, Ottawa.
- Gaborit J.-R.** (1996), « Sculptures hors contexte », dans *Actes du colloque international* organisé par le musée du Louvre le 29 avril 1994.
- Garcia Gomez I.** (2011), *Le soclage dans l'exposition, en attendant la lévitation des objets*, Dijon, Office de coopération et d'information muséales.
- Lechat A.** (2015), *La mise en valeur des sculptures fragmentaires en matériaux pierreux dans un contexte muséal. Quand la conservation et la présentation impliquent le montage des sculptures*, mémoire de master en Conservation-restauration des œuvres d'art, spécialité sculpture / ENSAV La Cambre / Bruxelles.
- Mouterde R., Fleury F.** (2007), *Comprendre simplement la résistance des matériaux, la structure, principes et enjeux pour la conception*, Paris : Ed. Le Moniteur.
- Piffaut C., Tamborero L.** (2007), « D'Alexandrie à Paris; restaurer et déplacer le lapidaire monumental », *CORÉ - Conservation et restauration du patrimoine culturel*, n° 18, p.6-13.
- Riccardelli C.** (2014), « The treatment of Tullio Lombardo's Adam : a new approach to the conservation of monumental marble sculpture », *Metropolitan museum journal*, n° 49.
- Susini H.** (2007), « Retrouver l'intégrité formelle et structurelle des sculptures », *Technè*, n° 25, p. 64-68.

### Les auteurs

**Hélène Collomb** étudiante en ingénierie mécanique et matériaux à l'École centrale de Nantes, [helene.collomb@eleves.ec-nantes.fr](mailto:helene.collomb@eleves.ec-nantes.fr).

**Anaïs Lechat** conservatrice-restauratrice diplômée ENSAV La Cambre (Bruxelles), spécialisée dans la restauration des œuvres sculptées, [anais.lechat@live.fr](mailto:anais.lechat@live.fr).