PROGRAMME REPTURE

ANNEXES 2

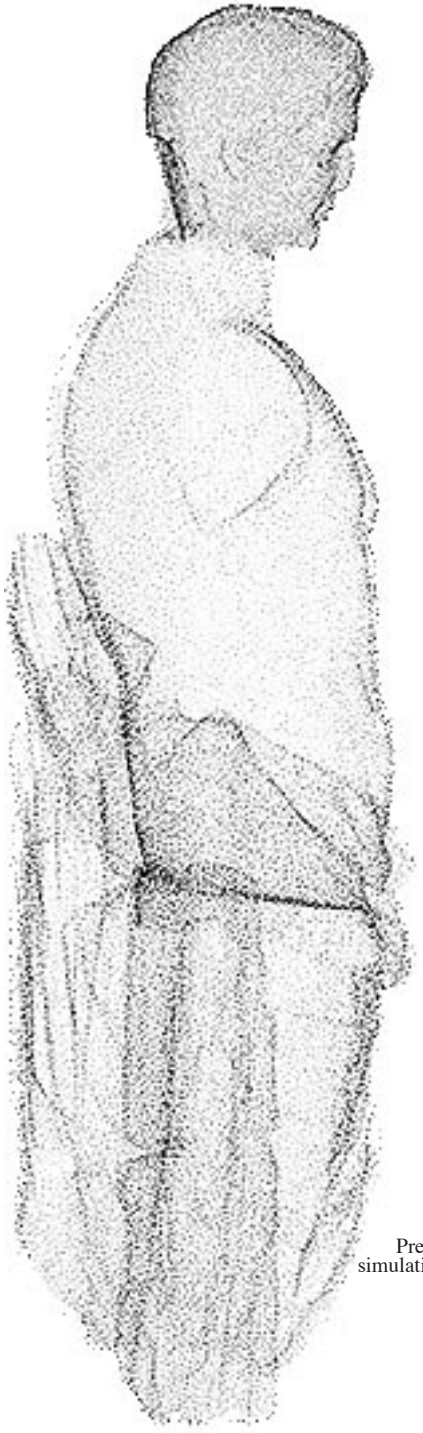
La restauration de la statue de Neptune au musée d'Arles en 2008 a été le point de départ de la constitution de l'équipe et de l'élaboration du projet Repture. Le travail accompli a été dévelloppé dans le rapport de restauration présenté ici dans les annexes du dossier Repture. Il apporte en effet par un exemple concret la compréhension du travail qui sera effectué dans le programme Repture, pour chaque œuvre, en amont de l'étude structurelle (numérisation et conception de la restauration par simulation informatique) et en aval pour ce qui relève de la restauration effective des œuvres étudiées.

Neptune

Musée départemental de l'Arles antique

Étude préalable par simulation informatique et restauration

Rapport d'intervention
Avril 2009
Sandrine et Benoit Coignard



Nuage de points
de la statue d'Auguste.
Première œuvre restaurée par
simulation informatique préalable
Arles - 1994

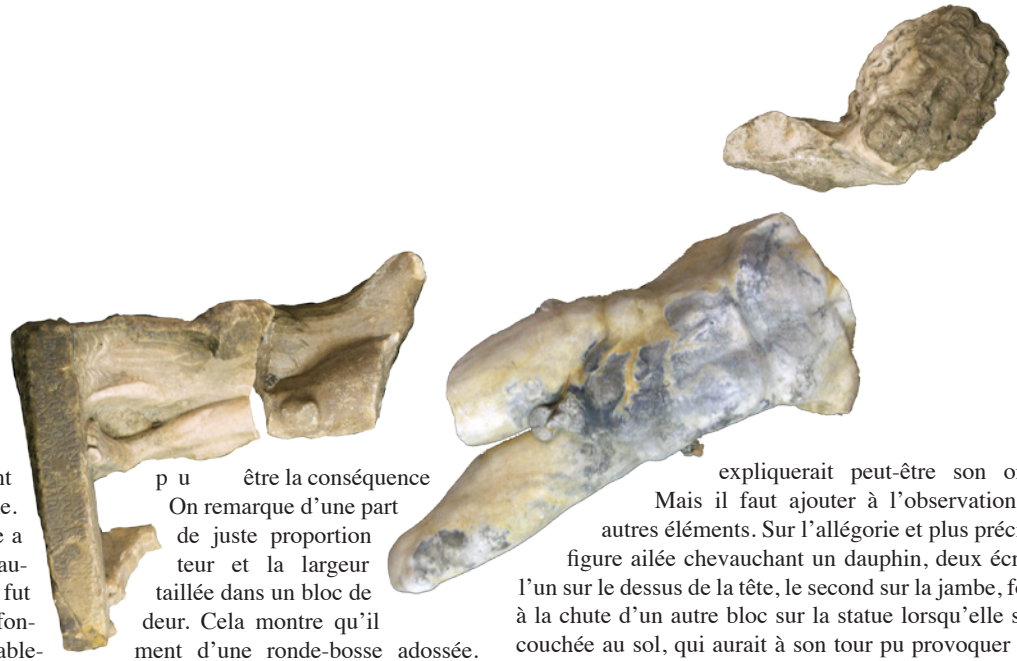
PRÉAMBULE

La restauration de la statue de Neptune, parce qu'il est rare que soit découvert un antique d'une telle qualité et vierge de toute restauration antérieure, a suscité de notre part une réflexion approfondie et une production méthodologique importante. L'œuvre nous invitait à remettre en cause nos habitudes de travail et nous obligeait à réactualiser une démarche innovante et prometteuse, vieille de vingt années déjà, mais qui n'avait connu que de rares occasions de se concrétiser.

C'était déjà au musée d'Arles, que pour la statue de l'empereur Auguste en 94, nous avions conduit avec Olivier et Roland Coignard, une première expérience de montage virtuel avant restauration. Puis en 98, grâce à la confiance d'Alain Charron, alors commissaire de l'exposition «la gloire d'Alexandrie» au Petit-Palais, la restauration du Colosse permit de faire progresser la méthode de simulation préalable. Ces deux initiatives ouvraient la voie à une approche scientifique des questions de structure en restauration de sculpture. Mais cette ample perspective d'évolution de notre pratique professionnelle était maintenue en veilleuse pour deux raisons : le coût prohibitif de ces technologies naissantes et plus encore, la difficulté de convaincre lorsque les idées sont trop nouvelles pour être comprises.

La statue de Neptune, accueillie au musée départemental de l'Arles antique dont l'équipe de conservation soutenait et partageait depuis les débuts notre démarche, était une de ces rares opportunités. Nous nous devions de la saisir et de dépasser autant que possible les limites atteintes lors des expériences précédentes. Au sortir de cette nouvelle étape, nous mesurons les nouveaux acquits et percevons les développements à venir. En rendre compte aujourd'hui, au-delà du désir de convaincre, comporte l'exigence de transmettre ce qui déjà, peut et doit entrer dans la pratique professionnelle. Ce rapport de restauration, en suivant pas à pas le parcours intellectuel, introduit le lecteur dans une exploration dont nous ne percevons pas encore la richesse et l'étendue des perspectives à venir. En partageant par le menu les méthodologies mises en œuvre, les résultats obtenus et les obstacles rencontrés, nous voulons inviter et guider les professionnels de la conservation-restauration désireux de s'engager à leur tour dans cette voie.

Première approche de l'œuvre



Trouvée brisée en 2007 dans le lit du Rhône - par Luc Long et son équipe lors d'une campagne de fouille du Drasme - dans un périmètre restreint mais à bonne distance les uns des autres, les quatre parties jointives de la statue de Neptune ne délivrent que peu d'information concernant les événements responsables de sa détérioration et les circonstances de son immersion. La faible érosion de sa surface démontre tout au plus que, mis à part la pigmentation variée, que son long séjour dans l'eau n'aura pas altéré la qualité de la sculpture. A-t-elle été cassée en tombant dans le Rhône ou précédemment ? La question est délicate. La pierre tombant dans l'eau de tout son poids est relativement freinée dans sa chute par le frottement de l'eau et la pression qui s'accroît avec la profondeur, ralentissant sa descente et amortissant le choc final. D'ailleurs, le lit de la rivière était-il à l'époque déjà envasé ou plutôt rocailleux ? Le courant n'étant pas assez puissant pour déplacer les morceaux, comment expliquer alors qu'ils n'aient pas été retrouvés côte à côte et au complet — c'est-à-dire avec le mollet, les bras et le trident — mais au contraire éparpillés à bonne distance les uns des autres. Faut-il invoquer d'autres facteurs de dispersion liés à l'activité humaine, comme une opération de dragage par exemple ? En l'état des hypothèses une probabilité logique nous amène à croire au contraire qu'elle fut brisée avant qu'elle ne soit jetée dans le cours de la rivière.

Peut-on alors trouver traces sur l'œuvre comme il fut évoqué, d'un acte de vandalisme perpétré lors d'une période agitée de l'histoire. Aucuns chocs volontaires — coups de masse nécessairement répétés jusqu'à la rupture — n'ont été assurément portés à la statue, du moins sur les parties retrouvées. Mais on ne peut exclure un acte volontaire provoquant la chute de l'œuvre d'une hauteur conséquente, laquelle aurait tout autant pu être la conséquence d'un séisme. On remarque d'une part que la statue a de juste proportion entre la hauteur et la largeur mais qu'elle fut taillée dans un bloc de faible profondeur. Cela montre qu'il s'agit probablement d'une ronde-bosse adossée. Plutôt que sur un socle, elle dût se trouver placée dans une niche ou sur la console d'un édifice. La base présente une surface très irrégulière. L'œuvre devait être scellée à l'édifice par un mortier compensant cette irrégularité. Enfin le traitement de la sculpture est sommaire au sommet du crâne montrant une entaille circulaire de la chevelure fait penser au placement d'une couronne.

L'écrasement du nez, du genou gauche du dieu et probablement aussi du sexe, prêchent en faveur d'une chute frontale. De même, la direction de deux des trois cassures corrobore cette hypothèse. Le choc sur la face aurait ainsi provoqué la rupture du cou se prolongeant naturellement en biseau vers l'arrière avec probablement des microfissures parallèles. Presque simultanément, le choc contre le genou et l'angle saillant supérieur droit de la base, aurait provoqué la cassure de la cuisse, orientée elle aussi vers l'arrière mais par un biseau inverse. Ces deux impacts « projettent » en quelque sorte le torse vers le bas lequel rencontra alors un troisième obstacle qui écrasa le sexe. Les bras, le mollet gauche (et le trident), de plus frêle section se sont certainement rompus au même moment. Par contre, la grande rupture horizontale sous le genou droit, perpendiculaire à la verticale de l'œuvre, est plus complexe à interpréter. L'épaississement progressif de la pierre vers le bas dans le contrefort de la jambe gauche accroissant sa résistance expliquerait peut-être son orientation. Mais il faut ajouter à l'observation quelques autres éléments. Sur l'allégorie et plus précisément la figure ailée chevauchant un dauphin, deux écrasements, l'un sur le dessus de la tête, le second sur la jambe, font penser à la chute d'un autre bloc sur la statue lorsqu'elle se trouvait couchée au sol, qui aurait à son tour pu provoquer la cassure inférieure. Deux éclats fort peu patinés sur la ligne arrière gauche de cette cassure laissent plutôt imaginer la conséquence d'un accident plus récent : la chute d'un autre objet dans le Rhône ou bien, une opération de dragage ou la levée d'une ancre s'accrochant à la pierre et la heurtant contre une autre.

Qu'il se soit agi sur la rive d'une destruction naturelle ou d'un sabotage culturel, il aura bien fallu une volonté humaine pour en répandre les restes dans le Rhône. Ces deux événements sont-ils d'ailleurs liés et consécutifs. Si oui, on peut attendre d'un acte symbolique contre l'image d'un dieu, donc d'une culture, que tous les fragments soient jetés sans en oublier sur la rive. Les fouilles du Rhône à l'avenir se donneront sans doute, entre autres objectifs, d'épuiser la recherche des bras, du trident et du mollet gauche de Neptune. Mais, la somme des inconnus ne permet, ni d'attendre en confiance leur découverte prochaine (dans le Rhône ou ailleurs un jour lors de fouilles sur la rive), pas plus que de l'exclure. Aborder le remontage et la présentation des quatre parties retrouvées supposait donc d'envisager cette intervention comme une première étape de la restauration de l'œuvre.

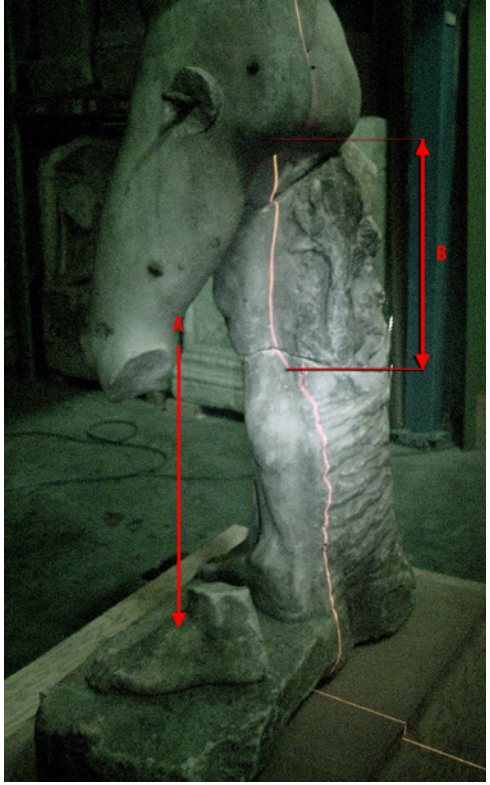
La restauration de structure entre tradition et révolution

Bien des statues retrouvées brisées et lacunaires — ces trois Neptune comme d'autres sujets — ont été restaurées par une approche empirique résultant de l'expérience artisanale. Celle-ci se fonde sur une tradition qui s'appuie sur une connaissance expérimentale de la résistance propre de la pierre, des collages et des inserts métalliques, et les combine en un système complexe mais efficace pour supporter durablement des efforts mécaniques importants, jusqu'à des porte-à-faux pour le moins audacieux (voir les images ci-dessus). On sait cependant avec le recul du temps, même lorsque ces œuvres ont été conservées dans de bonne condition (stabilité de la température et hygrométrie contrôlée prévenant l'oxydation des renforts métalliques et les effets de dilatation différentielle cyclique), que les tensions résultantes des forces mécaniques dues au déséquilibre des masses, s'exerçant sur une structure composite complexe (résistance à la compression de la pierre et à la traction des inserts métalliques) finissent par engendrer des désordres structurels et des altérations : des fissures apparaissent dans la pierre là où se concentrent les efforts, puis des écrasements de matière avec perte de l'épiderme. Que dire alors pour ces œuvres des conséquences de diverses sources de chocs ou de vibrations, chantier ponctuel, déplacement sur sol irrégulier et plus encore des transports routiers et des atterrissages. De fréquents microséismes en zone sensible peuvent aussi engendrer des effets similaires. L'Éros de Montauban, maintes fois restauré, dont le bras et l'arc furent trouvés désassemblés à l'ouverture de sa caisse en est la récente et regrettable démonstration.

Ce type de restauration par collage et goujons étant a priori irréversible nous souhaitions, pour entreprendre la restauration de la statue de Neptune, rechercher des alternatives techniques. L'une d'elle était la voie de la réversibilité. Les méthodes que nous avons expérimentées en 1995 sur une statue de danseuse du théâtre romain d'Arles, conservée au musée de l'Arles antique, étaient destinées à permettre une éventuelle destruction des époxy par migration des solvants jusqu'aux cœurs des inserts. Il s'agissait de goujons à corps creux façonnés sur mesure en fibre de verre et résine époxy contenant une mèche de coton. Un réseau de mèches incrustées sur les surfaces de collage dont l'extrémité enroulée était accessible sous des zones restituées devrait théoriquement permettre l'imprégnation et la diffusion de chlorure de méthylène pour détruire lentement la résine. La démarche reste intéressante, mais elle n'a pas été validée par des tests suffisants pour vérifier la faisabilité effective du démontage. Dans cette option la redécouverte du mollet gauche de Neptune poserait plusieurs problèmes. Il serait probablement difficile de le remettre en place entre le pied et le genou gauche sans devoir, soit dérestaurer l'œuvre (décoller les blocs), soit user les reliefs des surfaces de cassure ce qui n'est évidemment pas souhaitable. Et sans dérestauration, il serait tout à fait impossible de profiter de cette découverte pour redonner une solidarité structurelle (collage et goujons) entre pied, mollet et genou afin que leur association contribue à la solidité de l'ensemble, comme l'envisage une approche traditionnelle de la restauration de structure.

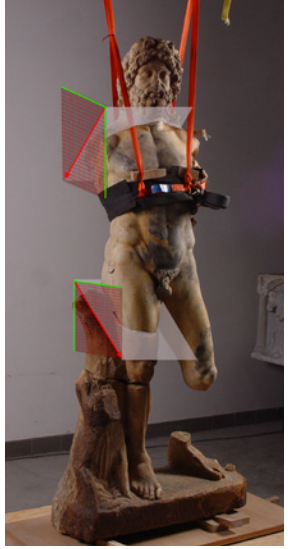
Ces réflexions nous amenaient à examiner avec intérêt une autre approche du problème. Et si l'œuvre était totalement démontable ? Pour sa sécurité, elle serait assemblée sur son socle et démontée lors d'un déplacement dans le musée ou pour une exposition. Dans cette option, il fallait que les procédures de montage soient parfaitement étudiées pour ne pas engendrer à leur tour des risques pour l'objet. Nous sentions tenir une piste nouvelle et intellectuellement satisfaisante, mais la solution la plus pertinente pour la conservation de l'œuvre était peut-être dans une voie intermédiaire conjuguant collage et assemblage. Plutôt que de trancher in fine intuitivement entre des hypothèses de travail de validité comparable, nous devions autant que possible les soumettre à des mesures susceptibles d'évaluer objectivement chaque projet d'intervention.

Verticalisation de Neptune en décembre 2007



Nous avons tout d'abord entrepris en décembre 2007 un prémontage des quatre parties de la statue. La base très irrégulière, avait dans un premier temps, été placée et calée sur un praticable mobile et articulé dans les axes X & Y. Le réglage de ce dispositif permit de matérialiser l'hypothèse logique selon laquelle l'inscription était horizontale. Sur le bloc de base a été posé le bloc du genou droit qui s'y adapte parfaitement et dont l'orientation du plan de cassure (proche de l'horizon) garanti en l'état une bonne stabilité. Le torse a ensuite été levé par un palan tandis que la tête fut placée entre les élingues en position exacte. Ici encore les plans de cassure portant peu d'usures coïncident précisément. L'orientation biaise et prononcée vers l'arrière de cette cassure ne permettrait pas le placement stable de la tête sur le torse. Elle a donc été retenue serrée par une sangle pour cette manipulation. Le plateau portant la base de la statue a ensuite été déplacé dans les axes X et Y, de telle sorte que s'associent les deux plans de la cassure au niveau de la cuisse droite, lesquels ont ensuite été rapprochés par translation verticale du torse et de la tête. Le contact entre ces deux parties était ici aussi excellent. Cependant l'orientation du plan de cassure et les faibles aspérités de sa forme n'offraient pas une assise mécanique suffisante pour maintenir le torse élingué au contact du bloc inférieur sans qu'un glissement sur l'avant ne survienne. Un déport de deux à trois centimètres sur la droite de Neptune de l'axe du palan, conjugué à une légère décharge du poids du torse sur la cuisse a permis de réaliser expérimentalement l'assise de l'ensemble torse/tête sur les deux blocs inférieurs de la jambe pour en étudier empiriquement la statique. Il était confirmé par le montage à sec que, si l'absence du mollet gauche déséquilibrait le torse. Si une partie de la charge transitait dans la jambe gauche (ci-dessus en A), le fléchissement important du genou gauche et sa faible section constituaient dès l'origine, une faiblesse structurelle. Dans ces conditions, l'apport du mollet retrouvé et l'ajout d'inserts métalliques pour l'associer à la cheville et au genou apporteraient peu de résistance supplémentaire mais des risques nouveaux en présence d'efforts structurels (rupture le long des goujons).

Lorsqu'une pierre élinguée est soutenue par un palan, l'axe vertical de ce dernier passe nécessairement par le centre de gravité. La projection de cet axe sur les parties inférieures désigne par où transiteront les charges des blocs supérieurs et les zones qui les subiront. Cette règle générale était ici faussée de deux à trois centimètres sur la droite comme indiqué précédemment. Cette déviation de l'axe paraissant peut importante, nous avons matérialisé sur la pierre et pour les quatre faces principales au moyen d'un niveau laser, la verticale passant par l'attache du palan aux élingues. On distingue clairement sur la vue arrière (ci-dessus en C) que cet axe est presque tangent à la cuisse et au mollet droit. Mais en réalité, du fait de la déviation sur la gauche, l'axe vertical réel du centre de gravité devait logiquement être corrigé de deux à trois centimètres sur la droite. En conséquence l'axe réel devait bien être tangent à la cuisse voir en léger porte-à-faux. L'exploration empirique montrait ici ses limites.



Cette première approche de la statique de l'œuvre remontée en l'état ne prenait en compte que la forme des blocs, leur superposition, et leurs degrés d'équilibre. Mais dans cette position précise, il était démontré que, les lignes de force étant tangentes au corps du matériau, le torse serait en situation de déséquilibre. On pouvait aussi constater que les efforts à contenir pour retenir le basculement du volume tête/torse ne serait pas important. Par contre, les charges transitant par le marbre seraient égales à la totalité du poids des blocs supérieurs et s'exerceraient à la rive de la pierre à l'intérieur et à l'arrière de la jambe droite, à l'endroit où l'assise est la plus étroite. Le matériau ne résisterait pas à cette pression ponctuelle. Des écrasements ou des éclats se produiraient aux rives des deux cassures superposées au dessus et en dessous du genou. Nous nous devions donc de compenser ce déséquilibre par quelques procédés à imaginer.

Le nettoyage des blocs, préalable de leur assemblage, et qui fut l'objet d'une succession d'interventions en collaboration avec notre confrère et ami Hervé Manis, sera l'objet d'une annexe à ce rapport dès que nous aurons reçu ses propres observations afin de pouvoir en rédiger la synthèse.

Numérisation et montage virtuel

Dépasser les limites de l'étude expérimentale supposait de mettre en œuvre les moyens techniques différents. Nous avions utilisé un scanner 3D pour étudier le remontage de la statue de l'empereur Auguste lors la grande campagne de restauration de 93/94 au musée d'Arles. La pertinence de la démarche et les résultats atteints alors restaient à nos yeux l'exemple de ce qu'il fallait entreprendre. Les progrès substantiels et prometteurs engendrés à l'époque dans notre pratique professionnel le avaient suscité une seconde expérience du même type pour la restauration de la statue de Ptolémée découverte par Jean-Yves Empereur dans la baie d'Alexandrie. Les techniques évoluant l'étude avait entrouvert des perspectives nouvelles pour l'étude mécanique de la structure par simulation informatique. Aussi souhaitions-nous pour Neptune, approfondir la démarche empirique par une étude de la statique et concevoir la restauration sur un modèle numérique en préalable à l'intervention.

Nous avons donc, en premier lieu, procéder à la saisie numérique de la volumétrie de chacune des quatre parties de l'œuvre au moyen d'un scanner par triangulation laser (VI-910 de Konica-Minolta). Les relevés ont été effectués en haute définition (nuage de points denses) en autant de points de vue que nécessaire pour couvrir la totalité de la surface de chacun des blocs. Les fichiers de chaque bloc ont ensuite été réunis et fusionnés en un seul référentiel. Nous disposions alors d'un clone numérique de la géométrie des quatre blocs. Ce travail constitue en soit un fichier de conservation préventive de la forme de l'œuvre (moulage optique) avant intervention permettant éventuellement sa reproduction fidèle et d'éventuels produits dérivés. Pour la suite de l'étude par simulation sur le modèle numérique, nous avons acquis un logiciel spécifique au traitement de fichiers 3D provenant d'objet réel (Géomagic Studio).

Une sculpture virtuelle est une peau séparant l'espace entre l'intérieur et l'extérieur. Cette frontière est composée d'une multitude de points relevés par triangulation à la surface de l'objet réel chacun défini par ses coordonnées XYZ. Cette méthode n'est jamais que l'évolution dans une technologie nouvelle de la méthode de relevés utilisée par les metteurs aux points dès l'antiquité. Chacun des points se raccorde aux trois points les plus proches par trois vecteurs. Il se forme ainsi un maillage de triangle sur lequel est tendu une facette orientée, c'est-à-dire qu'une perpendiculaire (une normale) distingue entre un + et un — ce qui est l'intérieur et l'extérieur de l'objet numérique. Dès qu'un bloc virtuel est fermé (les petits trous résiduels sont bouchés manuellement et quelques aberrations de saisies corrigées avant usage) le volume peut être calculé ainsi que le centre de gravité du bloc.

Le nombre de données atteint rapidement un volume considérable. Le plus petit des quatre fichiers, celui de la tête naturellement comportait à ce stade 2 251 596 triangles. Les fichiers des quatre blocs à réassembler auraient été trop volumineux pour permettre leur traitement avec 4Go de mémoire vive. Ils furent donc réduits une première fois pour être manipulables à 25 % du fichier initial.

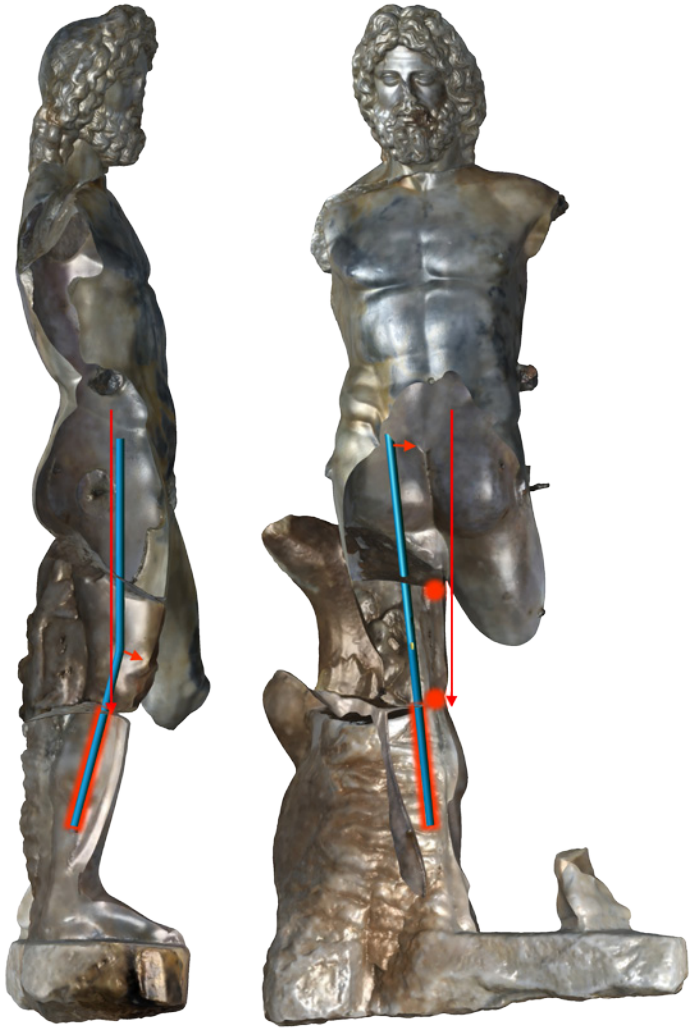
La réassociation des blocs entre eux, que nous pourrions appeler « collages virtuels » se fait par analyse du degré de similitude des plans de cassure. Pour ce faire, nous détournons de son usage la fonction logicielle conçue pour associer des fichiers de saisie contiguë du même objet par analyse du degré de similitude des zones de recouvrement. Les facettes des deux fichiers ainsi associées ont naturellement la même orientation des normales (définition de l'intérieur/extérieur). Pour pouvoir effectuer cette opération sur des blocs virtuels, il convient tout d'abord d'inverser l'orientation des normales d'un des deux objets. L'un reste un volume tandis que l'autre devient un trou dans l'espace de telle sorte que les deux surfaces de la cassure puissent être analysées comme une seule, comparées à elles-même et associées par recouvrement au plus près des similitudes détectées. Alors une légère interpénétration entre les deux formes se produit dont l'incidence est négligeable si les surfaces de cassure sont peu usées. Les blocs sont rapprochés mais demeurent des entités autonomes. Les normales sont renversées pour que le second bloc redevienne un volume. Leur position relative est verrouillée, avant de procéder au collage virtuel du troisième bloc. Ainsi étape par étape les blocs réassociés recomposent la statue.

Restitution de l'attitude

La seconde étape consistait à déterminer d'un point de vue purement stylistique, l'attitude restituée, c'est-à-dire la posture verticale la plus naturelle du sujet, sa base relativement informe ne délivrant aucune certitude sur laquelle se fonder. Le modèle virtuel tenant debout sans l'aide d'élingues ou autres ustensiles techniques utilisés pour le montage à blanc, facilitait à présent son appréciation sous tous les angles de vue. Nous avions déjà convenu avec Alain Charron de la position de départ. Vue de face l'inscription se devait d'être horizontale. Ce postulat semblait plausible et fut suivi pour prépositionner la base. De profil au contraire le plan supérieur de la base n'indiquait pas de position préférentielle. Seule la verticalité globale de la volumétrie du bloc peu profond dans lequel fut taillée la statue et le naturel de la posture du corps pourrait guider notre choix.

Nous avions espéré de cette étape qu'elle corrigerait sensiblement la position adoptée lors du montage expérimental de décembre 2007 de telle sorte que le poids transite plus au cœur du volume de la jambe. Ceci était d'autant plus attendu qu'à la réflexion il nous semblait que le sculpteur, traitant à partir d'un modèle vivant dans une attitude figée et donc stable, aurait visualisé autant que ressenti l'équilibre du corps représenté dans la matière. Puisque le poids était principalement en appui sur la jambe porteuse — bien que le bras gauche s'appuyant sur la hampe du trident pût en prendre une part — la statue aurait pu être un peu plus inclinée sur la droite du corps. L'inscription a priori horizontale s'en serait trouvée légèrement penchée sans que ce soit visible ou gênant. Il n'en fut rien. Le montage virtuel, dès lors que les quatre blocs assemblés furent verrouillés entre eux, nous permit assez naturellement de corriger la position jusqu'à acquérir un sentiment de naturel. Mais nous ressentions le besoin d'une autre vérification : soumettre notre

	VOLUME	POIDS	DENSITÉ
TÊTE	7,1818	19,20	2,6734
GENOU	8,9550	24,00	2,6801
	DENSITÉ MOYENNE	2,6767	
	VOLUME	DENSITÉ	POIDS
TORSE	38,3759	2,6767	102,72
BASE	44,8470	2,6767	120,04
TÊTE-TORSE	45,5577		121,92
TÊTE-TORSE-GENOU	54,5127		145,92
NEPTUNE	99,3597		265,97



choix à la comparaison avec une sélection de documents photographiques de statue antique (Neptune et autres). Elles nous furent certes aussi utiles que le ressenti de la posture de Neptune pour apprécier comment les sculpteurs d'alors exprimaient le poids du corps. Mais aucune remarque cependant ne nous amena à corriger la disposition première fondée sur l'horizontalité de l'inscription et la verticalité du profil du bloc. L'ultime démarche aurait été de faire usage d'un modèle vivant pour approfondir ce préalable et vérifier une dernière fois la pertinence de la proposition retenue. Nous l'avons en effet suggéré — et ce fut un temps envisagé pour le reportage télévisé — dans le but de tester anatomiquement les différentes hypothèses évoquées pour le geste des membres supérieurs manquants. La scanérisation des membres d'un modèle en représentation des différentes hypothèses émises pour la position des bras pourrait ainsi ajouter au modèle des propositions de restitution, qui seraient évaluées en comparaison de l'expression musculaire de la statue. Une telle étude mériterait sans doute d'être entreprise un jour. En attendant nous avions acquis le sentiment que nous pouvions arrêter notre décision. Celle-ci relève évidemment de notre seule appréciation, en toute subjectivité. Quelle qu'eut été la décision, l'important était de fixer la position pour pouvoir poursuivre l'étude, la posture globale ayant en effet une incidence directe sur les calculs qui suivraient.

Étude de la statique

L'étude statique pouvait être à présent entreprise. Chacune des entités géométriques fermées (blocs) avait déjà délivré deux mesures : son volume et son barycentre. Le poids réel de deux des quatre morceaux (la tête et le genou furent mesurés sur une balance de précision). Divisé par le volume de leur modèle mathématique respectif, ils donnèrent deux mesures de densité approchante du marbre, dont la moyenne est 2,6767. Cette précision plus que suffisante permit de déduire le poids de chaque morceau et celui de l'œuvre (voir tableau). La fusion de deux volumes (tête-torse) puis des trois volumes (tête-torse-genou) généra à son tour leur centre de gravité commun. L'addition des poids et volumes importe d'être effectuée ici depuis le haut vers le bas, la tête portant seule sur le torse, tandis que leur somme s'appuie sur le genou et ainsi de suite.

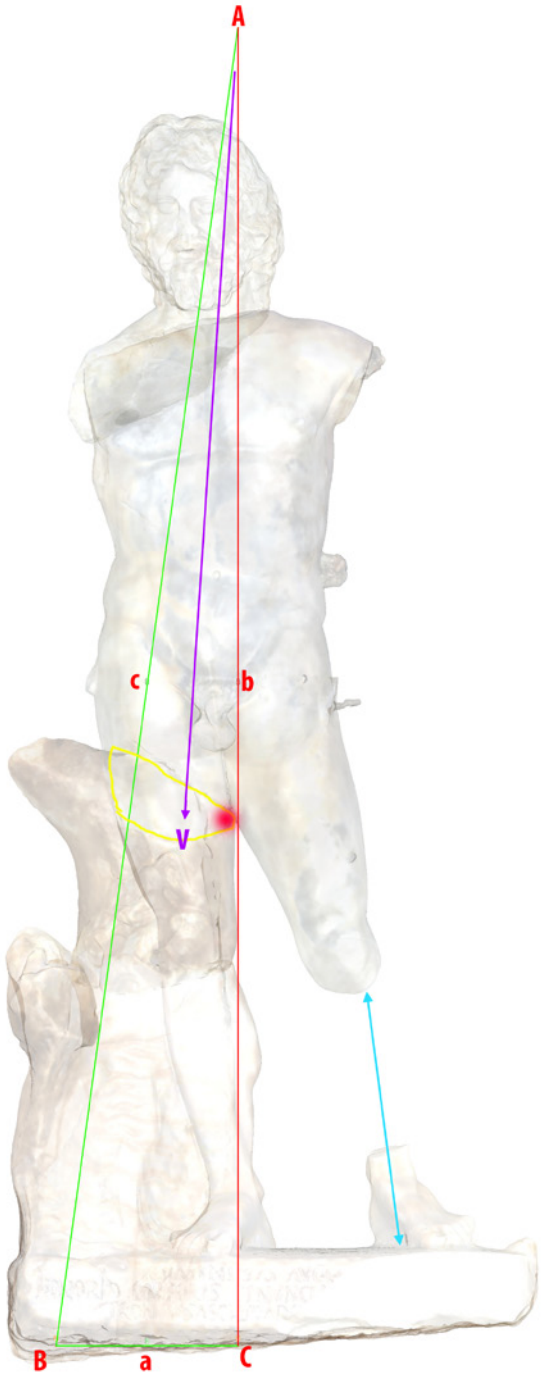
Il fut ensuite projeté une ligne verticale passant par chacun des centres de gravité des quatre blocs et de leurs sommes successives. Leur représentation graphique proportionnelle indique le vecteur poids et le moment par lesquels ils s'expriment sur le bloc inférieur. Ainsi la verticale du centre de gravité tête-torse (A) ne s'exprime pas sur le bloc du genou mais passe légèrement en dehors (5 mm). Il y a donc un très subtil porte-à-faux le torse basculant théoriquement sur l'arête du bloc du genou. Plus bas, la verticale du centre de gravité tête-torse-genou (B) s'exprime sur le bloc de la base très proche de la rive de la pierre (22 mm sur la cassure supérieure), puis ressort du matériau 21 centimètres plus bas et 9 cm au-dessus du coup de pied.

Un premier calcul de résistance pourrait dès lors être appliqué en se fondant d'une part sur les caractéristiques moyennes connues du marbre et d'autre part sur la configuration du volume où s'applique l'effort. Un même poids supporté par un marbre

dans sa masse, atteindrait, à la tangente d'une forme, la limite de rupture. Il faudrait de même prendre en compte de l'inclinaison des plans de cassure et ses incidences sur la qualité de l'assise d'un bloc sur l'autre. Si le bloc du genou se tient en toute stabilité sur celui de la base, il n'en est pas de même des surfaces où le torse et le genou se rejoignent et plus encore où la tête sur le torse s'assemble, car il s'agit de plans inclinés. Chacun de ces plans peut être traduit par simplification en un coefficient de pente. Ce coefficient permettrait d'évaluer les efforts horizontaux résultant du glissement d'un bloc supérieur sur le bloc inférieur. Il est certes possible de déterminer une pente moyenne de l'inclinaison globale. Même approximative, la détermination du degré d'inclinaison moyen des plans de jonction entre les blocs, permettrait théoriquement encore d'appliquer des calculs de résistance aux inserts métalliques subissant à ces endroits des efforts en cisaillement. Mais il faut reconnaître que le passage de la forme au coefficient de pente relève ici encore d'une forte approximation.

Aussi, examinons de plus prêt la question qui se pose. Pour deux surfaces planes, le glissement d'un bloc sur l'autre est théoriquement effectif dès le moindre degré d'angle par rapport à l'horizontal. Il est retenu par le niveau de rugosité des surfaces (microreliefs) qui peut être mesuré expérimentalement puis modélisé mathématiquement. Mais comment évaluer l'importance des variations de relief d'une surface quelconque formant un plan approximatif sur la résistance au glissement. Selon l'échelle (rapport entre les surfaces de contacts et des charges supportées) le relief constitue soit une macrorugosité à analyser comme les précédentes soit des discontinuités ponctuelles de pente formant des assises entre les blocs. Enfin, comment prendre en compte la résistance propre de ces reliefs à la rupture (cisaillement) pour une charge élevée ?

Ces questions encore en suspens trouveront des réponses dans un avenir proche. Des méthodes d'ingénierie mécanique se développent pour des applications de génie civil notamment, qui répondent à plusieurs de nos problématiques. Les ponts que nous établissons vers ces disciplines permettront d'approfondir notre recherche.



Détermination de la méthode de montage

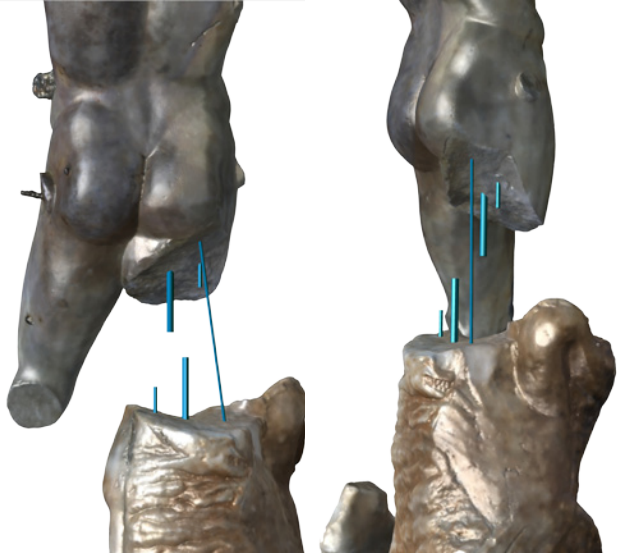
La réunion de ces trois blocs laissait de prime abord imaginer — sur le modèle du corps humain — qu'un insert métallique vertical traversant la jambe du haut de la cuisse jusqu'au mollet formerait un fémur et un tibia réunis. Légèrement fléchie au niveau du genou, cette armature était idéale et sa trajectoire facile à déterminer puisqu'elle suivait l'axe naturel de la jambe. Mais dans cette option se serait posés trois problèmes : D'une part, l'angle de la trajectoire se trouvant à mi-hauteur du bloc du genou aurait obligé à un percement de la pierre élargi pour permettre l'insertion d'un corps en acier plié ; D'autre part, l'axe vertical projetant le centre de gravité torse/tête passait tangentiellement à l'extérieur de la jambe. Les efforts en torsion sur l'insert pouvaient le déformer et transférer les efforts sur la pierre qui pourrait s'écraser à la jonction des blocs. De plus, la torsion du corps en acier collé dans la pierre menacerait de la faire éclater longitudinalement, c'est-à-dire parallèlement à l'insert. Pour éviter cela, la section de l'insert se devait d'être forte ; Enfin le rapport défavorable entre le poids du torse et la faible section du mollet faisait supporter toute la charge sur ce point faible de la statue à l'extrémité du goujon. Dans la suite à venir de notre étude, un calcul de résistance du marbre pour cette charge à cette section et une mesure des efforts subis en torsion par le corps en acier nous permettront d'évaluer les risques théoriques qui nous ont fait écarter par précaution cette première option de remontage.

Une seconde hypothèse aurait consisté à soutenir le poids en dévers par une prothèse externe soutenant le genou gauche ou retenant l'épaule gauche. Ces options avaient quant à elles deux inconvénients majeurs. À la visibilité de la prothèse — admissible si la nécessité était avérée — s'ajoutait la flexibilité du métal et sa propension à se dilater avec les variations de température. Or dilatation et flexion auraient toutes deux annulé l'avantage du soutien attendu. Celui-ci en effet ne subit pas de charges considérables mais se doit de les contenir au plus près du volume de la pierre. S'il s'en écarte d'un petit mil-

limètre vers le bas, il ne jouerait plus son rôle, et les efforts se transféreraient aussitôt à la pierre se traduisant en compression à la jonction des blocs.

Une troisième hypothèse nous est venue à l'esprit en traçant une ligne diagonale entre le tronc auquel s'adosse la jambe et le torse de Neptune. Intuitivement, visuellement, cette ligne inclinée (c) ne porte pas la charge mais la retient de basculer. Il faudrait donc exprimer un effort en traction sur le torse dans cet axe. Cette force s'ajouterait à la gravité. La somme des deux forces s'exprimerait selon un vecteur intermédiaire (V) susceptible d'équilibrer la charge subie par le marbre dans une bonne répartition entre les blocs. Pour ne pas générer un mouvement giratoire secondaire, il importe que les deux vecteurs, la verticale de la gravité (b) et la traction sur le torse (c) soient sur le même plan. La force exprimée en traction selon l'axe c doit pouvoir être calculé précisément pour une position optimale de V.

Cette approche nouvelle nous a immédiatement semblé pertinente. Il ne s'agissait plus en effet de résister passivement à des forces statiques mais à résoudre dynamiquement un problème d'équilibre mesurable. Il ne serait plus besoin d'inserts en acier de diamètre suffisamment importants pour qu'ils ne puissent fléchir, mais d'un tendeur qui pourrait se traduire par un câble souple de quelques millimètres de section. Selon ce principe, d'un point de vue strictement théorique, la tension d'un câble convenablement située dans le même plan que la verticale du centre de gravité suffirait à équilibrer les blocs au niveau de la cassure du genou (si la statue n'est jamais heurtée évidemment). La cassure supérieure par contre demandait impérativement un goujon du fait de son plan fortement incliné et qu'en conséquence ce goujon résiste au cisaillement. Mais il faut ajouter au point de vue théorique une prise en compte des étapes techniques successives du montage. Ainsi le bloc du genou ne doit pas pouvoir bouger accidentellement au moment du rapprochement du torse. En conséquence, un goujon entre la base et le genou serait une sage précaution. Par ailleurs, lors du rapprochement de deux blocs de pierre, le moment du contact concentre tous les risques. Le choc même léger peut en effet produire des écrasements ponctuels si les deux pierres n'étant pas en exacte vis à vis ne se touchent qu'en un point. Une seconde précaution logique s'imposait : un second goujon, de petite section, destiné au centrage des deux parties viendrait compléter le dispositif pour que, coulissant comme sur deux rails, les deux blocs se rencontrent dans leur position exacte. Restait l'assemblage de la tête sur le torse pour laquelle du fait de la forte inclinaison de la cassure et d'une lacune importante la présence de deux goujons, l'un pour la tenue le second pour le centrage, s'imposait aussi.



Les clones virtuels ont des qualités inverses aux blocs qu'ils représentent dans le modèle numérique de la statue. Ce sont en effet des corps creux, ils ne sont pas soumis à la gravité et ils peuvent être coupés en tous sens et en parfaite réversibilité. Cela permet donc des visualisations tout à fait improbables sur le réel comme celles-ci qui ont le mérite de contrôler le projet d'intervention de multiples manières et de corriger les trajectoires envisagées autant de fois que nécessaire.

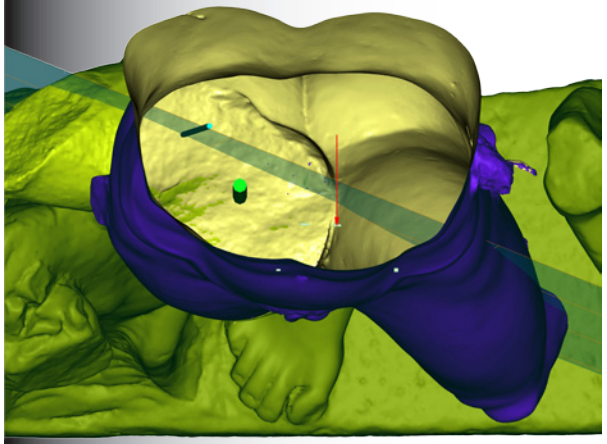
Modélisation du dispositif de montage

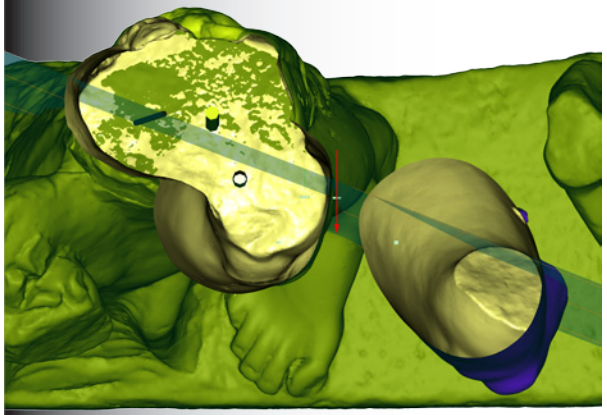
Les éléments du dispositif de montage étaient à présent définis. Il fallait à présent formaliser chacun et trouver leur disposition optimale sur le modèle numérique. Les goujons entre deux blocs devraient être parallèles pour s'emboîter convenablement ce qui exigera une procédure de percement très rigoureuse. Les blocs devant s'emboîter de haut en bas, donc le torse au moyen d'un palan, nous partions du principe que les sis goujons seraient exactement verticaux donc parallèles. Leur disposition dans la pierre respecterait encore quelques règles logiques : les goujons principaux seraient situés le plus possible dans le corps du matériau pour les efforts qu'ils feraient subir à la pierre lors des montages et des démontages ; ils se situeraient en outre aussi près que possible du plan passant par les deux vecteurs de force, C et B en à mi-distance entre les deux afin de contribuer autant que possible à supporter le poids tout en annulant les efforts en torsion. L'application de

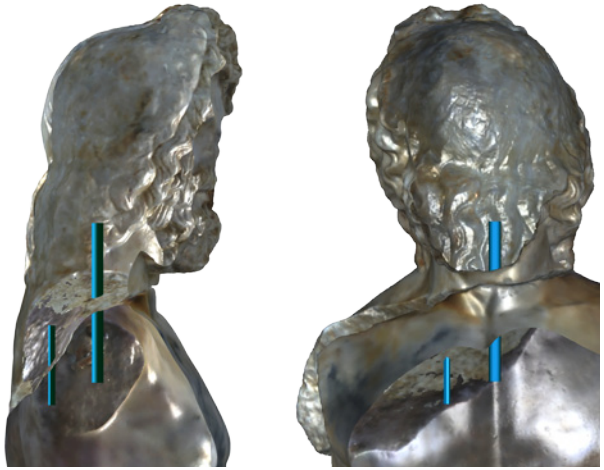
Toutes les images de cette page montrent les inserts métalliques dans le corps de la statue visualisables grâce à des coupes du modèle numérique.

Ci-dessous,
Le plan bleu en diagonale passe par à la fois par la verticale du centre de gravité (en rouge) et par le tendeur destiné à équilibrer l'appui des pierres entre elles.

À droite les goujons assemblant la tête au torse et en bas à droite les goujons et le tendeur assemblant le torse et le genou à la base. Les petits goujons de centrage ont été cachés pour facilité la lecture des images





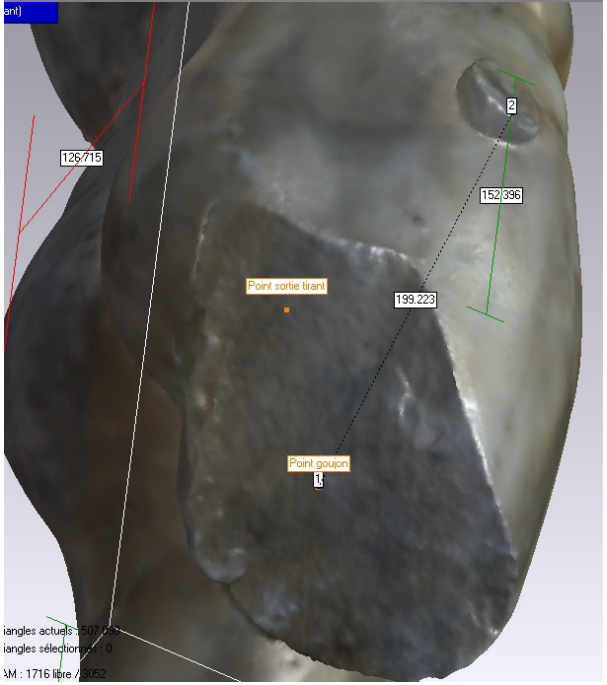


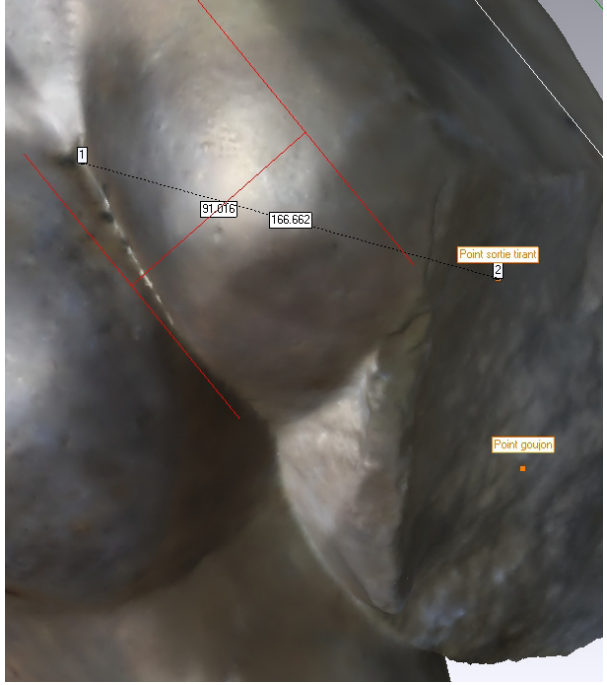
ces deux règles serait évidemment un compromis. Quand aux petits goujons de centrage, nous leur demanderions seulement de se trouver à une distance suffisante des goujons principaux pour un guidage précis.

La principale difficulté que nous pensions rencontrer dans cet exercice était de déterminer et d'optimiser la longue trajectoire du câble dans le corps de la statue. Il devrait en effet s'attacher assez profondément dans le torse, traverser le bloc du genou puis la base pour ressortir sous la statue où il se trouverait tendu par un dispositif à définir. La règle que nous nous fixions pour optimiser l'efficacité du tendeur dans l'équilibrage de la statue serait que sa trajectoire passe le plus loin possible de la verticale du centre de gravité. La tension à exprimer s'en trouverait minimalisée. Cette trajectoire devrait éviter quelques dangers, par exemple de traverser la pierre en passant à proximité de la profonde entaille sculptée entre la cuisse et le contrefort dans le bloc du genou droit. Nous avions d'ailleurs envisagé dès l'étude préliminaire devoir déterminer pour cette raison une trajectoire non pas rectiligne, mais une ligne brisée susceptible de reculer le percement au niveau du creusement cuisse/contrefort évitant ainsi que le trou ne passe à fleur de l'épiderme de la statue créant une probable fragilité.

La modélisation informatique rend dans ces problématiques de très grands services aux restaurateurs. Outre l'intérêt de pouvoir tâtonner sans risque, expérimenter plusieurs hypothèses avant d'intervenir sur l'objet, mais puisqu'un clone numérique n'est qu'une peau enfermant un espace, elles offrent la possibilité tout à fait nouvelle et particulièrement utile, de visualiser un goujon dans le volume de la statue et de mesurer en tout point de son parcours la distance qui le sépare wde l'épiderme. De quelques points de vue qu'on le souhaite, et à tout moment du travail, une coupe perpendiculaire au regard de l'opérateur (ou plus exactement parallèle à l'écran) permet à celui-ci d'occulter un tronçon de l'objet pour visualiser l'intérieur. La profondeur de la coupe est réglable en fonction des besoins et le modèle peut apparaître soit avec le relevé vidéographique de sa surface soit par une couleur uniforme afin d'accroître par contraste certain détails.

Ainsi la trajectoire du câble pu être corrigée progressivement jusqu'à atteindre l'emplacement répondant le mieux aux critères que nous nous étions donnés. De même pour le positionnement parallèle des goujons à mi-chemin de chaque bloc. Au terme de la modélisation de tous les inserts métalliques prévus, l'intersection entre leurs axes respectifs et la surface de chaque bloc fut défini par un point. Celui-ci allait nous permettre à présent de refaire le chemin à l'envers, de transférer du montage virtuel et de la simulation de la restauration, jusque sur l'objet réel, les données nécessaires et suffisamment précises pour entreprendre sa restauration conformément aux décisions de l'étude.



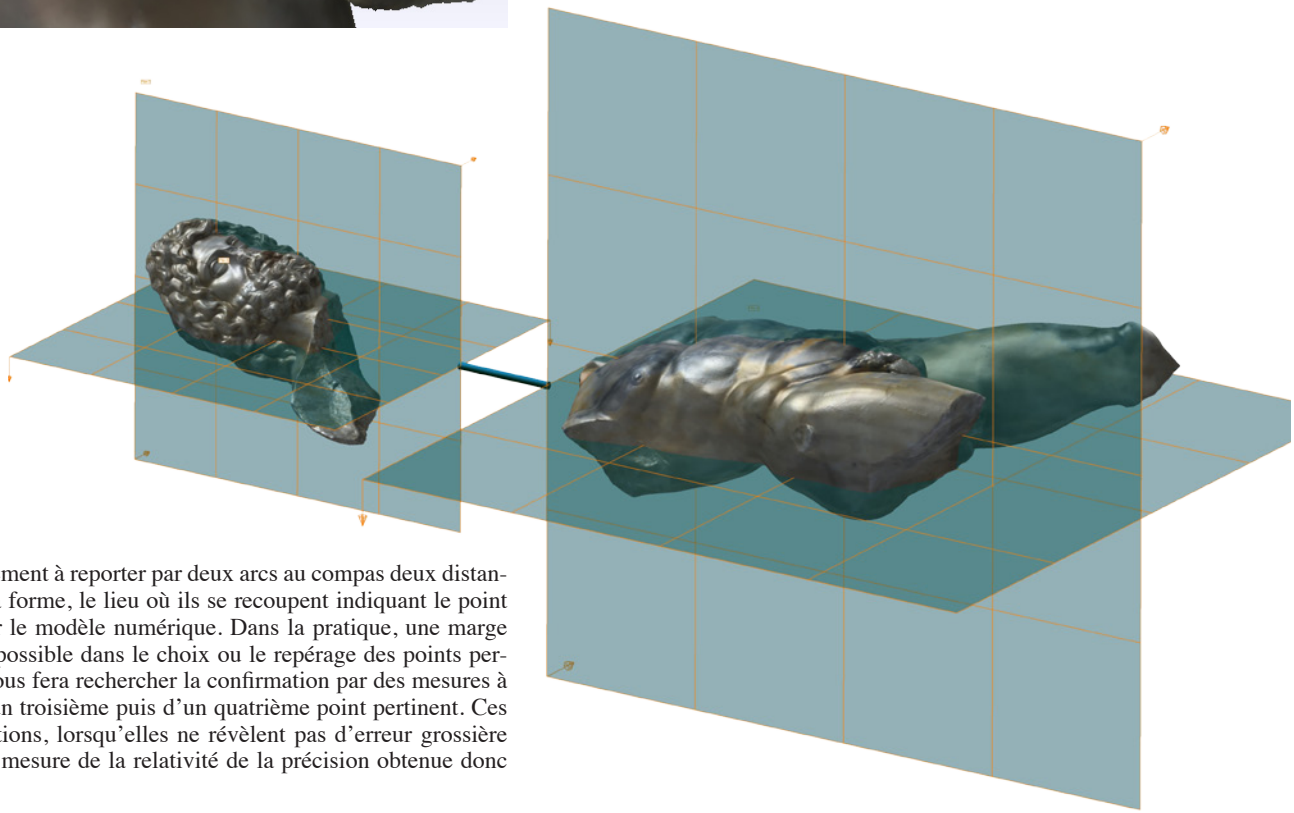


Retour du virtuel au réel

Sur chaque bloc, il existe des points repérables à la fois sur la pierre et sur le modèle numérique. Des détails précis de la sculpture comme la commissure d'un œil ou d'une lèvre, la pointe d'un sein, l'extrémité d'une mèche de chevelure, mais aussi des défauts du matériau (inclusion ou trou) et des marques des accidents survenus à sa surface (éraflures, discontinuité des lignes sur les lèvres des cassures) sont autant de « points pertinents » en ce qu'ils permettent de repérer des concordances rigoureuses entre le relevé et la forme. Même les tâches sur la pierre nous ont aidé ponctuellement à ces repérages, ce qui justifie amplement que le scanner employé effectue la saisie d'une image vidéographique simultanée et superposable au relevé de la géométrie.

Les points qu'il nous importe de reporter sont évidemment les lieux où les axes des goujons traversent la surface des blocs. Ce seront les centres des percements. Une procédure logicielle permet de mesurer la distance entre deux points sur la surface virtuelle. Ainsi, la méthode consiste-t-elle à mesurer les distances qui séparent chacun des centres de percement des « points pertinents » environnants. Deux points pertinents suffisent théoriquement à reporter par deux arcs au compas deux distances sur la forme, le lieu où ils se recoupent indiquant le point défini sur le modèle numérique. Dans la pratique, une marge d'erreur possible dans le choix ou le repérage des points pertinents nous fera rechercher la confirmation par des mesures à partir d'un troisième puis d'un quatrième point pertinent. Ces confirmations, lorsqu'elles ne révèlent pas d'erreur grossière donne la mesure de la relativité de la précision obtenue donc des limites de la méthode. Le troisième et le quatrième arc de cercle ne se superposent en effet jamais parfaitement au point défini par le croisement des deux premiers.

Après les centres de percement, il convient de reporter les axes. Sur le modèle numérique, un axe est la ligne optimum retenue pour définir l'emplacement d'un insert dans la statue. Mis à part le cas particulier du tirant, tous les inserts de Neptune sont parallèles puisqu'ils sont verticaux (axe Z). Par chaque axe passe deux plans perpendiculaires, YX et XZ. Chacun de ces plans coupe les blocs en deux parties, traversant continûment leur surface. Si l'intersection entre un plan et une forme ne passe pas forcément par des points pertinents de la surface, la distance qui sépare ces points perpendiculairement au plan est par contre relevable sur le modèle numérique et donc reportable sur la pierre.



Un faisceau laser plan contraint dans l'horizontal et un second contraint dans la verticale (deux niveaux lasers du commerce) vont permettre de reporter les plans perpendiculaires du modèle sur les blocs de Neptune. Une différence tiendra au fait que les percements se feront à l'horizontal pour favoriser l'évacuation de la poudre de marbre. Les percements seront donc orientés en Y et les plans de repérage seront pour l'horizontale en XY et pour la verticale en YZ. Le faisceau laser plan vertical (YZ) est réglable en X tandis que le faisceau laser plan horizontal (XY) est réglable en Z sur un pied d'appareil photo.

L'équipement de percement est composée de quatre parties : d'un grand plateau fixe mais inclinable en X et en Y pour placer le premier bloc, d'un chemin de roulement horizontal, d'une perceuse montée sur un chariot circulant sur ce chemin de roulement, d'un second chariot circulant lui-même sur ce chemin de roulement pour porter et rapprocher le second bloc du premier. La translation sur le rail servira de guide précis au percement. Le chariot de percement sera amovible pour le rapprochement des blocs et inversable pour permettre le percement du premier puis du second bloc dans le même axe. L'alignement de la mèche sur le centre de percement s'effectuera par une seconde translation horizontale perpendiculaire et par une distanciation verticale réglable par serrage d'un jeu de cales superposées.

Les percements s'effectuant entre deux blocs, l'un des deux est nécessairement plus lourd et/ou moins maniable que l'autre. Celui-ci sera donc placé en position fixe sur le plateau calé de telle sorte que le faisceau horizontal et le faisceau vertical se croisent sur la cassure sur le centre du percement tracé sur le bloc au compas. Un second réglage sera effectué par l'inclinaison du plateau en X et en Y jusqu'à ce que les deux faisceaux se superposent dans la profondeur sur le plan théorique passant sur le modèle numérique par l'axe du goujon.

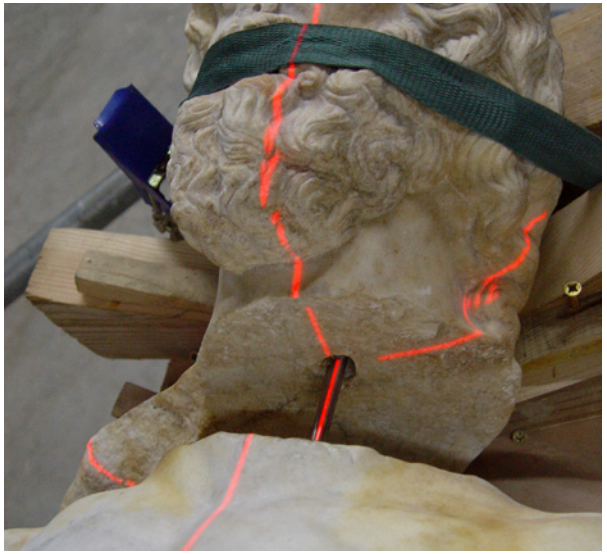
Les percements

La méthodologie étant définie et l'équipement réuni nous pouvions entreprendre les percements. Le faisceau laser vertical fut mis en place parallèlement au chemin de roulement. Une mèche longue fut ensuite introduite dans le mandrin de la perceuse. Le chariot de percement permettant une translation de gauche à droite, la mèche fut alignée au faisceau et réglée en Z parallèlement au chemin de roulement. Le second faisceau laser donnant l'horizontal devait alors être mis en place à hauteur de la mèche laquelle se réglerait à son tour parallèlement au faisceau. Pour ce faire, le chariot de percement était muni d'un mécanisme permettant de basculer la perceuse sur elle-même en X et en Z afin que l'alignement de la mèche en Y soit à la foi horizontale et parallèle au chemin de roulement ; le réglage fut affiné jusqu'à ce que les deux faisceaux laser se croisent au milieu la mèche dont la longueur garantie la meilleure précision.

Il y aurait quatre grandes étapes : L'assemblage Base-Genou, l'assemblage Genou-Torse, l'assemblage Torse-Tête et le percement Base-Genou-Torse pour introduction du tendeur. L'interface Torse-Tête, Base-Genou et Genou-Torse ayant en commun les mêmes successions de séquences, décrire l'une revient à décrire l'autre. Nous avons commencé par l'assemblage Torse-Tête aux moindres enjeux structurels qui nous servit d'ultime mise au point pour les deux assemblages majeurs. Mais nous décrirons en détail l'assemblage Genou-Torse.

Le torse fut placé sur le grand plateau fixe. Un premier ajustement plaça le centre du percement du goujon principal tracé sur la pierre au milieu de la cuisse face à l'extrémité de la mèche. Les deux faisceaux laser s'y croisaient alors, la cuisse fut à peu prêt calée. Le second ajustement, en déplaçant le haut du torse de gauche à droite et de haut en bas et en pivotant sur l'axe de percement devait faire globalement coïncider la projection des plans laser sur la pierre avec les plans théoriques par un calage sous le torse. Ce réglage fut affiné par les vérins filetés prévus sous le plateau pour son ajustement final. Le torse fut alors solidement maintenu dans cette position par un ensemble de cales vissées entre elles et au plateau de bois puis arrimée par une sangle à cliquet. À ce stade, le chariot de la perceuse empêchant le placement du bloc du genou fut temporairement retiré du chemin de roulement.

La seconde séquence consistait à mettre en place le genou sur le chariot prévu à cet effet. Il fut donc placé au contact du torse en position exacte et les deux blocs furent maintenus entre eux par une sangle à cliquet. Le second chariot fut placé en dessous du genou et de nombreuses cales de bois furent mises en



À gauche, les flèches indiquent les mouvements de translations prévus dans le dispositif de percement. Ce système garanti le parallélisme des fourreaux collés dans la pierre et donc le bon coulissement des goujons comme indiqué par la photo de droite. Ci-dessous, un percement effectué avec une carotteuse au diamant et à l'eau pour le prélèvement de marbre en vue d'une analyse à venir.

place et vissées entre elles et au plateau de bois du chariot pour supporter et maintenir ce second bloc en juste position. À ce calage fut ajoutée une emprunte en résine moulée à la pierre et collée aux cales de bois destinée à immobiliser totalement le bloc sur le chariot et à le maintenir serré par une autre sangle à cliquet. Après polymérisation de la résine, ce dispositif permettait de retirer la sangle qui associait temporairement les deux blocs de telle sorte que le genou puisse être éloigné du torse par déplacement du chariot jusqu'à l'extrémité du chemin de roulement puis rapprocher en retour au contact du torse en ayant précisément conservé sa position d'origine.

Le chariot du genou pouvait alors être placé à l'extrémité du chemin de roulement pour que soit remis en place le chariot de percement pour la troisième séquence. Une mèche courte et fine fut introduite dans le mandrin de la perceuse pour le premier percement. La profondeur du percement déterminée sur la simulation était reportée sur la mèche par un adhésif. Le second percement avec une mèche du diamètre juste supérieur à la taille du fourreau fut entrepris, guidé par la précision du premier.

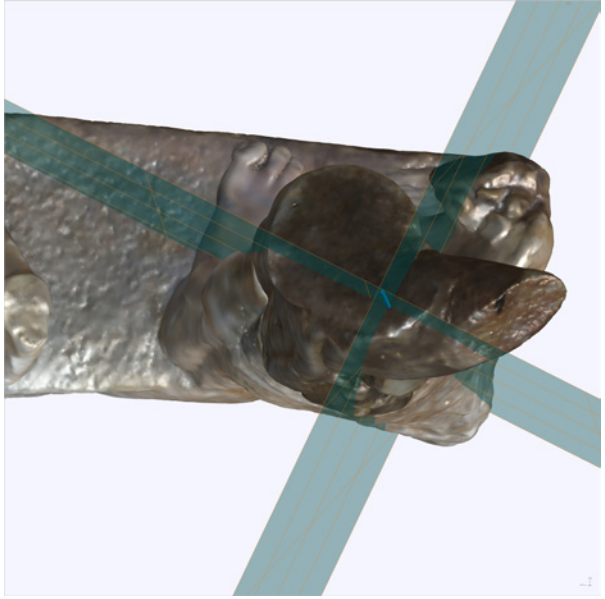
Le chariot de percement permettant d'ajuster de gauche à droite et de bas en haut la position de la perceuse, donc de la mèche sans rien perdre de son parallélisme au chemin de roulement, il était aisé dans cette quatrième séquence de mettre la mèche dans l'axe du second trou, celui du goujon secondaire, en vis-à-vis de son centre tracé au compas sur la cassure de la cuisse. Et le second trou fut percé.

La cinquième séquence était celle du retournement du chariot de percement. Le mandrin se trouvait alors du côté du bloc du genou. La mèche fut à nouveau alignée sur le centre du goujon principal mais cette fois pour le percement de son emplacement dans le genou. Faut-il sans lasser le lecteur décrire la sixième séquence, en tout point semblable à la quatrième pour le percement du trou en vis à vis pour le placement du goujon secondaire ?

La septième séquence, quand à elle, achève et vérifie la cohérence de toutes les précédentes. Le chariot de percement a fait son travail et est retiré. Les fourreaux sont mis en place dans les percements, les gros dans les trous du goujon principal, les petits dans ceux du goujon secondaire. Les goujons sont ensuite introduits dans l'un des deux fourreaux. Le « jeu » des fourreaux dans les percements est faible (2 mm). Un léger décalage pourrait empêcher le rapprochement des deux blocs. Le chariot du genou est alors approché du torse. Les goujons sont invités manuellement à s'emboîter dans les fourreaux qui leur font face. Le rapprochement des deux blocs jusqu'au contact se fait alors parfaitement. Par la méthodologie mise en œuvre, les quatre percements sont donc suffisamment en vis à vis et parallèles pour que l'on puisse procéder au collage des quatre fourreaux dans le marbre. Le lendemain, le déboîtement des goujons sera l'ultime vérification et s'effectuera sans difficulté. Le jeu consistant à éloigner puis rapprocher intimement les deux blocs en toute aisance et à pincer une bande de papier entre les deux pierre restera une curiosité expérimentée quelques jours durant pour l'étonnement qu'il nous procurait.

Bien qu'au final le résultat soit tout aussi satisfaisant, nous serons moins heureux lors de l'étape suivante consistant à assembler la base et le genou de Neptune. Nous n'avions rien changé à la méthodologie si ce n'est qu'à la place des mèches de carbure de tungstène, nous avons utilisé des carotteuses au diamant afin de prélever des échantillons de marbre suffisant pour procéder ultérieurement à sa caractérisation physique et chimique. Le lit de la pierre étant pour cette statue en position verticale, nous avons à cet endroit rencontré une veine plus résistante qui tendait à dévier sensiblement le percement. Le décalage qui en résultat, bien que faible empêchait le rapprochement des deux parties en présence des goujons et fourreaux. Les inserts se coinçaient. Il fallu en conséquence replacer le chariot de percement pour élargir deux trous avec une mèche de section supérieure et faire un collage en deux étapes avec une procédure particulière pour conserver un parallélisme que l'élargissement de ces trous aurait pu compromettre.

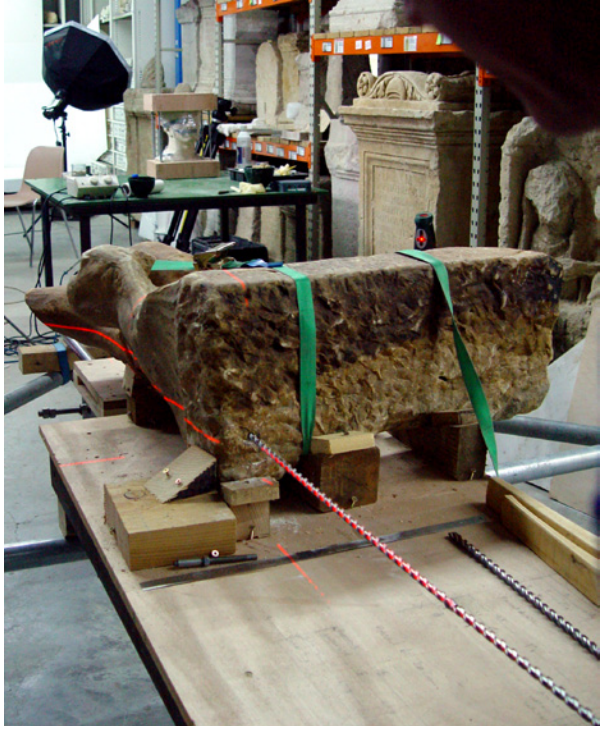
La quatrième étape concernait le percement Base-Genou-Torse, soit un trou de petit diamètre (1 cm) pour introduction du tendeur (un câble et ses équipements) mais d'une longueur totale de 1 m. Cet unique trou avait comme autre particularité de ne pas s'orienter dans un axe orthogonal. Il était a priori plus facile de mettre les trous en exacte vis à vis, puisque les blocs de la base et du genou seraient percés de part en part et qu'il suffirait donc d'amorcer chacun des trous à partir du bloc précédemment percé en les associant l'un à l'autre. Par con-



tre, les difficultés rencontrées lors de la seconde étape (interface Base-Genou) causée par l'hétérogénéité du marbre dans une zone qui en serait l'immédiate continuité nous faisaient craindre une déviation de l'axe du percement, d'autant plus probable que la mèche serait plus fine et la distance plus longue. Cette crainte était d'autant plus réelle que la trajectoire du percement conçu par simulation, avait été placée au plus près de la surface de l'œuvre pour optimiser l'angle du tendeur et donc minimaliser l'effort à exercer en tension pour équilibrer la répartition des charges entre les pierres. La position initialement déterminée sur le modèle informatique a par précaution été légèrement corrigée pour diminuer ce risque. L'axe du trou qui devait tout d'abord passer dans la zone critique à 35 mm de l'épiderme, ne laissant donc que 30 mm de marbre passera en fait selon la trajectoire nouvelle à 50 mm, laissant ainsi une marge de sécurité de 45 mm. Le percement a dons été entrepris tout d'abord dans le bloc de la base depuis le haut (cassure du genou) jusqu'en bas (sous la base, à l'angle arrière gauche). Une déviation s'est bien produite comme nous le craignons. Par rapport à la trajectoire indiquée par le croisement des deux plans laser, la mèche aura dévié de 1,5 cm vers l'extérieur de la pierre sur une longueur de 52 cm soit une déviation de 3 % pour une mèche de 10 mm de diamètre. Notre inquiétude s'avérait fondée dans le principe mais dans la pratique la déviation de la trajectoire initiale dans la zone critique (à mis hauteur) aura été négligeable.

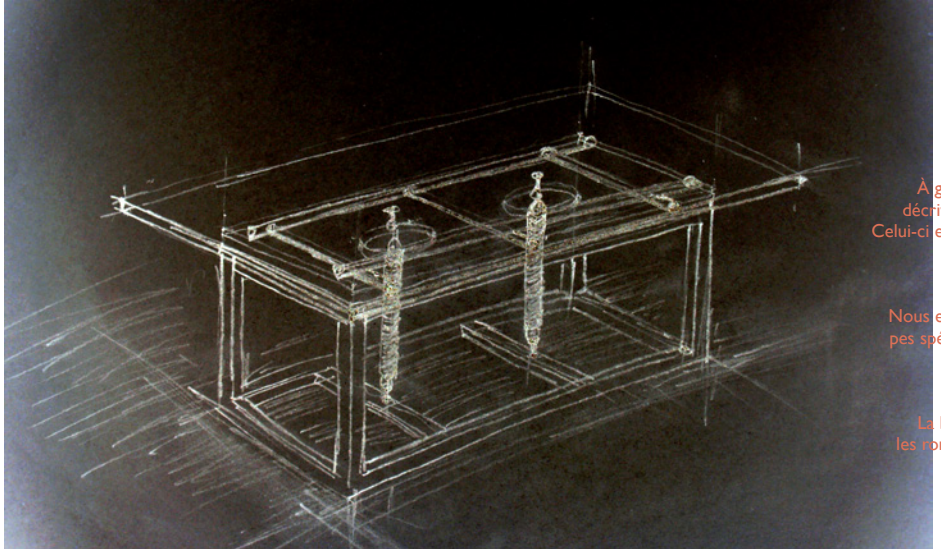
Le second percement fut naturellement celui du bloc du genou, arrimé à la base par une sangle à cliquet. Une mèche de 1 m permis de franchir l'épaisseur des deux blocs. Le dernier trou dans le torse fut entrepris depuis celui du genou maintenu au contact du torse. Son diamètre fut légèrement agrandi pour permettre l'introduction du système de fixation amovible du câble dans le marbre. De même le trou fut agrandi sur 2 cm de profondeur sur la cassure supérieure du bloc du genou pour introduire l'extrémité inférieure de ce système de fixation. Enfin, il fut aussi agrandi sous la base sur 2 cm pour former une assise élargie à la rondelle et à l'écrou destinés à mettre le câble en tension.

En haut à gauche et ci-dessus, dans la base et le genou se croisent les deux plans perpendiculaires définissants l'axe du percement du tendeur. Celui-ci a été effectué depuis la cassure du genou sur la base vers le dessous de la statue. Dans un second temps, le genou maintenu au contact par une sangle à cliquet, a été percé depuis le dessous de la base, le trou servant de guide.



La conception du socle

La mise en tension du câble qui parachevait le montage en équilibrant la répartition des charges, nécessiterait un accès libre sous l'angle arrière gauche de la statue de Neptune. Or on se souvient de l'irrégularité de la base qu'il faudrait à présent compenser en recréant une assise. L'installation de l'œuvre à l'époque romaine a dû se faire par un calage et collage maçonné. Notre première intention avait été de réaliser une semelle en mortier de résine moulé remplissant tout le vide entre la planéité du socle et la pierre. Pour une bonne réversibilité, la semelle ne devait pas être collée. La conception ultérieure de l'équilibrage par le câble sans remettre tout à fait en question le principe de la semelle moulée, nous invitait à reconsidérer le problème. Enfin, un dernier facteur nous venait à l'esprit. Vue de profil cette ronde-bosse adossée est particulièrement peu profonde. Le bloc de pierre dont est issue la statue ne dépassait pas les 30 cm d'épaisseur. (Rectangle englobant de la statue en l'absence des bras est de : L. = 74 cm ; P. = 30 cm ; H. = 172 cm). Lors d'un moindre tremblement de terre, Neptune serait



À gauche, un croquis du socle antisismique décrivant le principe de son fonctionnement. Celui-ci est amené à être modifié encore lors de sa mise au point.
Les plans seront communiqués après achèvement.
Nous espérons aussi son évaluation par l'équipes spécialisées qui s'est montrée intéressée à son principe.

À droite,
La base renversée sur laquelle sont collées les rondelles de centrage des tiges formant le support de l'œuvre.

parmi les premières œuvres du musée à osciller sur sa base. Si la base de Neptune lors de ces mouvements se déchaussait de la semelle moulée l'incidence serait immédiate. La statue chuterait.

Arles se situe en effet dans une zone sismique sensible. Avant l'ouverture du nouveau musée et 94, un sismologue avait d'ailleurs été diligenté pour donner son avis sur la stabilité de quelques œuvres, pour leur sécurité et celle du public. Parmi celles-ci était la statue colossale de l'empereur Auguste que nous avions numérisée et sur laquelle nous avions fait le premier montage virtuel. Nous nous étions pris à rêver alors de la possibilité d'explorer par simulation sur son clone numérique les risques envisagés. Quelques années plus tard, en 1998, en charge de l'installation au Métropolitain Muséum de Tokyo de la collection des chefs-d'œuvre de l'art Khmer du musée de Phnom Penh et du musée des arts asiatiques Guimet, nous avions conçu un principe de socle antisismique, mais trop tard pour qu'il fût mis en œuvre, sur cette série de statues en grés, en maints endroits restaurés dont la statique nous inquiétait particulièrement.

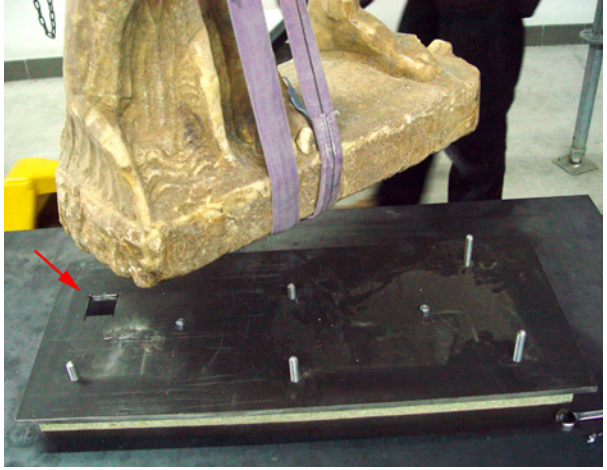
Quoi de plus naturel alors en faisant la synthèse de ces démarches que de faire profiter Neptune d'un prototype de socle qui assurerait sa stabilité dans l'espace en cas de tremblement de terre, du moins pour les mouvements horizontaux (à l'épicentre des séismes surviennent parfois comme à Kobe des mouvements verticaux particulièrement destructeurs pour lesquelles nous ne connaissons pas de parades ; les mouvements horizontaux par contre sont plus couramment enregistrés). Il est plusieurs manières de décliner techniquement le principe de ce socle. Sur un volume parallélépipédique, le mécanisme antisismique du socle de Neptune se compose de trois plaques d'acier entre lesquelles s'interposent des rouleaux parallèles permettant aux plaques de rouler l'une sur l'autre. Il y a donc deux étages de rouleaux entre les trois plaques. Les rouleaux du second étage sont disposés contradictoirement à ceux du premier étage de façon à engendrer deux mouvements perpendiculaires. Pour ramener en douceur les plaques en mouvement à leur position d'origine, deux ressors tendus parallèlement traversent verticalement les trois plaques et s'accrochent à la base du socle. Ainsi si la terre tremblant fait subir au socle des mouvements latéraux, l'inertie de la statue et des deux plaques d'acier disposées sur les rouleaux résistera à ces mouvements et en neutralisera les conséquences pour la statue de Neptune dans les limites de l'amplitude des mouvements (ceux pris en compte se situe dans un cercle horizontal de 16 cm) et de leur durée évidemment.

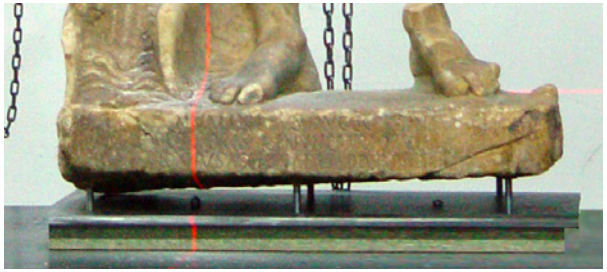
Sur la plaque supérieure du socle de Neptune ont été placées une réhausse de 3 cm et une quatrième plaque d'acier, au format de la base. Une fenêtre a été pratiquée dans cette plaque à l'angle arrière gauche pour laisser passer le système de mise en tension du câble. De même, l'angle arrière gauche de la rehausse a été découpé afin de permettre le dépassement de la clef pour le serrage de l'écrou.

Enfin, la neutralisation des risques de déchaussement de la base sur sa semelle par le mécanisme de prévention, nous autorisait à présent à le mettre en œuvre. C'est alors qu'Alain Charron nous proposa une solution plus élégante encore, sur le modèle d'autre socle que nous avions précédemment conçu pour le musée. Une base irrégulière peut être soutenue sans pour autant être cachée grâce à une série de tiges filetées répartie sous la base et disposée à l'aplomb d'un creux de la pierre. Le réglage vertical de chaque tige filetée mise en contact de la pierre permet d'asseoir la charge et de la répartir entre chaque tige. En un point seulement la pierre est en contact du support, ce point bas se trouvant justement à proximité de la sortie du tendeur, à l'arrière gauche de la statue. Pour accroître la qualité

de l'assise entre le marbre et les tiges verticales, une rondelle de centrement est collée par un petit plot de mortier de résine aisément réversible (par application d'un tampon de chlorure de méthylène).

Cependant, le temps ne nous a pas permis en 2008 d'achever notre prototype de socle antisismique. Il nous manquait alors principalement les deux ressorts et un délai de mise au point, à quelques semaines de l'émission de télévision de France 3 dont Neptune serait une des vedettes. Nous souhaitons pouvoir mener à son terme cette initiative dans le courant 2009. Il nous faut aussi remettre à plus tard une étude globale par simulation informatique du comportement de la statue de Neptune en cas de séisme. Le centre d'étude sismique du CEA nous avait reçu en 1999 au sujet de notre socle. Nous avions à cette occasion pris connaissance des progrès accomplis dans la modélisation informatique de l'effet des secousses sismiques sur les structures complexes comme les immeubles en béton armé et évidemment fait le parallèle avec les statues restaurées. Recontacté pour Neptune, malgré l'intérêt qu'elle manifeste pour ce projet, l'équipe du CEA, en pleine restructuration et faute d'un financement approprié, n'a pas pu répondre à notre attente. Ce n'est, nous l'espérons, que partie remise.





Le montage

Le cylindre à la base de la moitié saillante du goujon ci-contre est taraudé. Il évolue verticalement sur le filetage de sorte d'être réglé pour asseoir la charge du bloc supérieur en recevant en appui le corps en acier creux — le fourreau — collé dans la pierre.

La base est donc placée sur le plateau du socle en faisant coïncider les cinq rondelles aux cinq tiges filetées, le sixième point d'appui étant directement au contact de la plaque. La hauteur sortante des tiges filetées avait été réglée par des mesures prises sur le modèle numérique. Nous vérifions donc tout d'abord que l'inscription est bien horizontale, que de profil l'inclinaison que l'assise correspond à celle du montage virtuel. L'équilibre de la statue — en particulier son dévers arrière — en dépend. Un dernier ajustement des vérins filetés permet de s'assurer que les six points d'appuis sont au contact de la statue.

Sont alors placés les deux premiers goujons dans les fourreaux collés dans la base : le goujon principal et le goujon de centrage. Le goujon de centrage, comme son nom l'indique permet de s'assurer qu'au moment de leur rapprochement les deux blocs seront en juste place. À défaut l'ajustement de la position se ferait à tâtons au risque de frotter et d'user les surfaces de contact. Le goujon principal est lui aussi l'objet d'une innovation technique. À mi-longueur en effet, le corps cylindrique en acier inoxydable au diamètre interne du fourreau comporte un élargissement au diamètre externe du fourreau. Cet élargissement permet au goujon de porter sur le fourreau scellé. Au-dessus de l'élargissement le goujon est fileté et reçoit un écrou cylindrique au diamètre externe du fourreau. Cet écrou sera réglé de telle sorte que lorsque le bloc du genou est superposé à la base, le goujon emboîté supporte le fourreau du bloc supérieur. Donc le poids du bloc supérieur porte en principe sur le corps métallique. Pour le vérifier, une série de bandes de papier sont placées entre les deux blocs à la périphérie de leur jonction. Tout juste coincée entre les deux blocs une traction sur le papier permet pourtant de la retirer. À la jonction des blocs de la base et du genou dont l'association ne posait pas de problème particulier, cette innovation peut paraître superflue. Mais en tant qu'exercice, elle nous fut utile et prit tout son sens à l'étage supérieure pour l'assise de la cuisse sur le bloc du genou.

Toute la problématique du montage, analysée et théoriquement solutionnée par la simulation, se trouvait concentrée dans cette seconde étape du montage de Neptune : la mise en place du torse. La compréhension que nous pensions avoir acquise, et en conséquence l'enchaînement logique des procédures mis en œuvre s'y trouverait soit confirmé, soit invalidé. Moins que ces deux extrêmes nous envisagions de possibles ajustements. Le torse fut donc suspendu par un palan, lui-même accroché à un pont roulant qui nous permettrait au moment opportun de le placer à l'aplomb de la base et du genou. A ce stade, il importait surtout de placer la chaîne du palan dans l'axe choisi sur le montage virtuel afin que le torse soit rigoureusement dans la

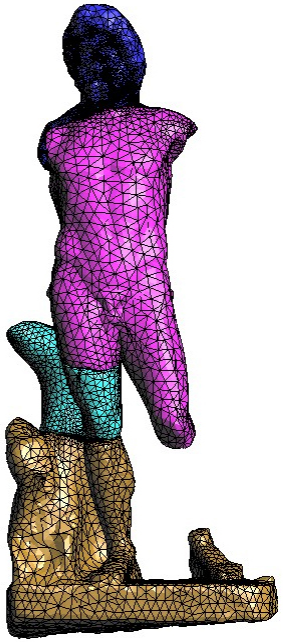
même orientation spatiale. Cette disposition fera que les deux cassures se rejoindront en juste position et que par conséquent les deux goujons étant parallèles aux fourreaux, l'emboîtement et le coulissement servant de guide au rapprochement seront aisés. Ici encore l'orientation du torse dans l'espace se fit au moyen des deux faisceaux laser plans, tout deux verticaux à présent. Ils furent pointés perpendiculairement l'un à l'autre sur la chaîne du palan. Il ne restait pour retrouver la position conforme au modèle numérique qu'à faire osciller le torse de gauche à droite et d'avant en arrière sur les élingues qui le reliaient à la chaîne.

Relevé à bonne hauteur et amener à l'aplomb de la base et du genou, un premier rapprochement fut entrepris. La descente progressive, l'emboîtage des goujons, leur coulissement se firent sans difficultés jusqu'au contact. Il ne fallait pas envisager à ce stade de relâcher le poids. En relevant le torse à plusieurs reprises de quelques centimètres, l'écrou cylindrique sur le corps du goujon principal fut réglé jusqu'à ce qu'une série de bandes de papier disposées à la périphérie de la cassure soit pratiquement libre d'être retirée d'entre les deux parties rapprochées.

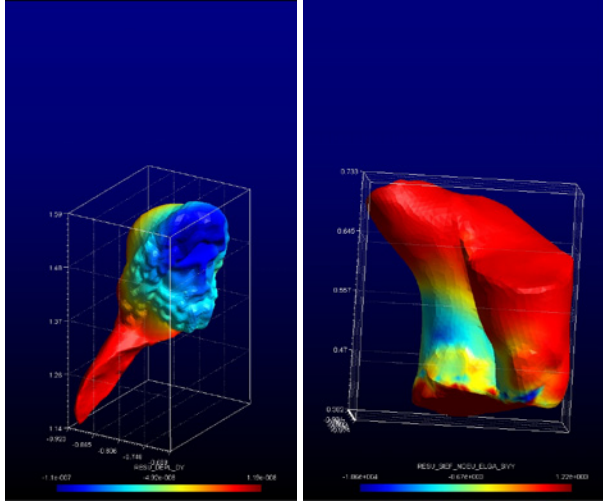
Une dernière procédure et non de moindre importance devait être mise en œuvre : la mise en place du câble. Afin de rendre notre intervention aussi réversible que possible, nous avions conçu un système de fixation mécanique du câble dans la pierre. Sur le principe des chevilles à expansion du commerce, le câble fut retenu par une soudure à l'extrémité d'un cylindre creux muni en haut d'une butée extérieure et d'un filetage en partie basse. Sur ce cylindre furent enfilées quatre segments de tube s'appuyant les uns aux autres sur une tranche conique, l'ensemble se trouvant fermé par un écrou. Les trois premiers tronçons étant refendu verticalement en six pans, lors du serrage de l'écrou la contrainte exercée entre les segments provoque l'écartement des pans qui mordent immédiatement dans le marbre puisque le percement est tout juste supérieur au diamètre de l'acier. Cette précision évite que se déforment les segments refendus, ce qui empêcherait leur extraction ultérieure. La profondeur du trou et du système de fixation (20 cm), et la répartition de l'effort en expansion sur trois segments, permettent de minimaliser le serrage de l'écrou et de garantir la moindre tension du marbre.

Le câble après serrage fut donc enfilé dans le trou pour traverser le genou et la base. En son autre extrémité avait préalablement été placé au second tube fileté en partie basse retenu prisonnier du câble par une soudure finale. Tout doucement le torse fut une dernière fois descendu à proximité du contact avec le bloc du genou et une couronne de bande de papier placée à la périphérie. Arrivées au contact l'une de l'autre, le poids se trouvant partiellement relâché, les bandes de papier sur la face interne de la cuisse étaient à présent solidement coincées entre les lèvres de la cassure, tandis que celles se trouvant passées à l'opposé, c'est-à-dire à l'arrière droit de la cuisse de Neptune étaient tout à fait libres. L'extrémité du câble quant à lui était parvenu à la sortie de la pierre sous la base. Une rondelle et un écrou y furent placés et vissés jusqu'au contact. Le serrage progressif par demi-tour fut beaucoup plus court que nous ne l'imaginions.

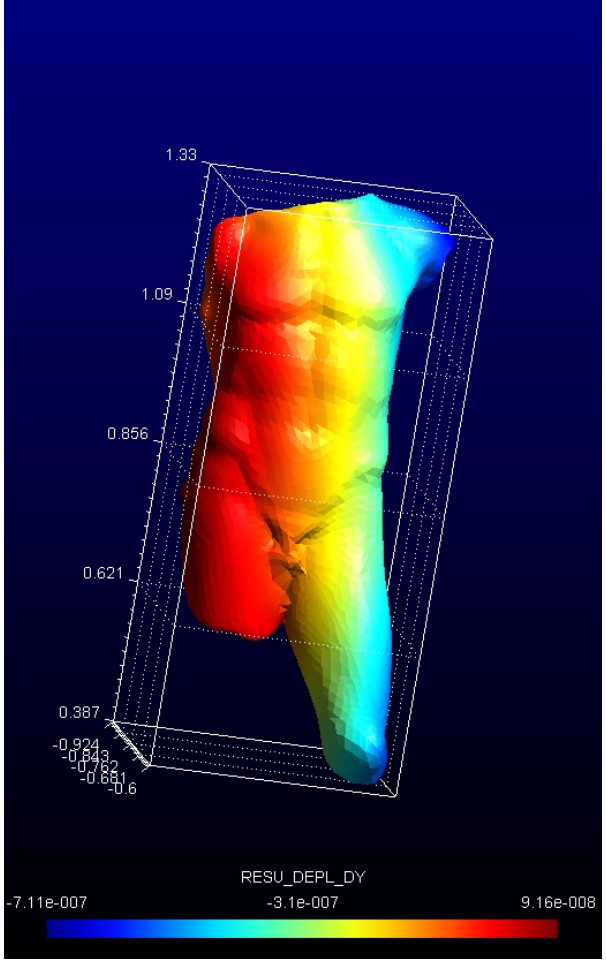
Très vite les feuilles précédemment libres à l'arrière droit de la cuisse furent à leur tour pincées tandis que celles de la face interne de la cuisse se trouvaient libérées démontrant que le poids était à présent supporté par le goujon et que la tension du câble s'ajoutait au poids pour répartir les charges entre les deux pierres. Il était possible à présent de libérer tout à fait le poids du torse sur le genou. Dans les jours à venir la charge en appui sur le goujon provoquera un léger fluage de la résine de collage (époxy : Araldite AW106), tassement de l'épaisseur d'une feuille de papier, et le contact entre les deux pierres sera intimement retrouvé avec l'assurance que la somme de la gravité et de la tension du câble assurera une répartition homogène des charges entre les pierres, statique et dynamique coopérant à cet équilibre reconquis. La mise en place de la tête n'était plus qu'une formalité dans l'achèvement de l'assemblage de Neptune.



L'avenir



Les images ici présentées ne prétendent pas en l'état fournir une mesure scientifique fiable des efforts s'exprimant sur le corps de Neptune pour chacune de ses blocs. Ce travail est en cours.
L'image de gauche montre l'apparence à la surface du maillage qui subdivise le volume dont chaque module portera les caractéristiques du marbre de Neptune et permettra d'évaluer en tout endroit de la forme des efforts subits
Considérant en toute relativité la graduation des couleurs, l'image de la tête montre que la charge verticale accroît la tension sur la partie basse au contact du tronc. L'image du genou donne la mesure de la charge subite par le placement du torse ; tandis que l'image du torse montre les efforts en cisaillement de la masse en porte-à-faux.



Toutes les questions engendrées par la démarche originale entreprise pour la restauration de la statue de Neptune sont éminemment utiles à la compréhension concrète des problèmes de structure qui se posent pour la conservation et la restauration des sculptures. Si les études de mécanique n'ont pu véritablement être effectuées avant la restauration comme nous en avions l'intention, il demeure dans nos projets de les faire aboutir, pour l'intérêt méthodologique qu'ils représentent et par conséquent pour l'usage qui en sera fait lors de restaurations à venir. Car des outils existent en effet et des disciplines vers lesquelles nous nous tournons pour poursuivre notre investigation. Une sérieuse incursion avait déjà été faîte sur le logiciel Aster d'EDF en 1998 pour mesurer la résistance du granite d'Assouan dans la forme du Ptolémée d'Alexandrie dont l'assise étroite supportait le torse de 17 Tonnes, la tête de 2,5 Tonnes, et la couronne de 2 Tonnes.

Aujourd'hui, grâce à la collaboration de Dashnor Hoxha, chercheur au PRISME, (Institut de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique et Énergie), et professeur à l'École Polytechnique d'Orléans un début d'étude de mécanique a été entrepris sur Neptune. Les quatre volumes du modèle numérique ont été subdivisés par un maillage géométrique interne en une multitude de tétraèdres. Chacun de ces modules de base reçoit les caractéristiques du matériau (résistance à la compression, traction, cisaillement, etc.) qui ne sont pas encore précisément celles de Neptune tant que des mesures n'ont pas été effectuées sur les prélèvements obtenus par carottage (percement des goujons). L'ordonnance verticale de la forme crée une ample hiérarchie cumulative des charges qui est calculée pour chaque module du maillage interne, lequel s'exprime visuellement par une graduation de couleur du bleu jusqu'au rouge lorsque l'on atteint des tensions élevées. Cette graduation deviendra significative des efforts subits par le matériau en tout point de la géométrie tridimensionnelle de l'œuvre. Les rouges indiqueront les zones critiques ou la structure du marbre pourrait connaître une rupture ou un écrasement. Les calculs seront fiables lorsque les données instruisant le modèle auront été définies et introduite au plus prêt des caractéristiques de l'objet réel. Ces premiers résultats sont donc encore scientifiquement relatifs. L'analyse ne fait que débuter. En attendant, les quelques visualisations présentées ici ont le mérite d'illustrer la démarche en cours.

Au-delà de Neptune, et peut-être grâce à l'énergie qu'il nous fit investir, un autre projet est en cours de développement. Il vise à constituer une équipe pluridisciplinaire rassemblant des professionnels de la conservation et de la restauration, et des chercheurs, dans l'objectif de développer une démarche scientifique adaptée à l'étude des questions de structure et des solutions que l'ingénierie et la technologie peuvent apporter à la restauration des sculptures. Depuis deux décennies en effet, le développement des techniques de numérisation 3D jette un pont entre la restauration de sculpture et un univers scientifi-

que et technologique très en avance, celui de la mécanique. Cette idée simple va générer des progrès rapides et importants dans l'établissement d'un diagnostic des questions de structure d'une œuvre d'art et dans la conception des réponses technologiques.

Nous attendons de cette démarche, une intégration dans les modèles numériques de sculpture de toutes données significatives de son état de structure, acquises par divers procédés (scanner 3D, Tomodensitométrie à rayon X et Gamma, Vitesse de propagation du son, etc.), pour soumettre un modèle global pertinent aux outils d'analyse développés par les disciplines de la physique, en mécanique statique et dynamique, en sismologie, en thermique, etc.

Les objectifs seront évidemment comme le démontre Neptune, d'assister les restaurateurs en évaluant leurs projets d'intervention ; Mais plus largement ils seront de fournir aux responsables du patrimoine une assistance au diagnostic, des méthodes pour décrire la distribution des efforts dans la structure globale d'une œuvre, blocs originaux et éléments techniques rapportés (mesures d'élasticité non-linéaires), pour prédire leur évolution dans le temps, pour comprendre les altérations survenues (fissures, cassures, écrasements) et enfin pour les prévenir. Ces méthodes permettront d'évaluer le risque d'endommagement de la structure dû à l'exposition et au maintien en situation de présentation particulière (constante et/ou variations climatiques, hygrométriques, chocs thermiques et pluviométrie en cas de présentation en extérieur) et de proposer les solutions alternatives pour la présentation de l'œuvre. Il faudra enfin étudier les risques dynamiques, glissement des surfaces des œuvres assemblées et leurs conséquences (macro et microrugosité, mesures des efforts en cisaillement sur les reliefs et les inserts), l'aérodynamisme de la forme en cas soumission aux vents ; la prévision de l'impact de séismes, de transports par camion, d'atterrissages, etc., comme d'évaluer leurs solutions techniques (socle antisismique) et définir les principes directeurs pour la réalisation de conditionnement sécurisés, etc.

Bref, de l'empereur Auguste à Neptune et passant par Ptolémée d'Alexandrie, et grâce à la confiance de la conservation du musée d'Arles et en particulier d'Alain Charron qui nous accompagne intellectuellement dans ces aventures, leur fruit sera peut-être à terme comme nous voulons le croire, la création d'un laboratoire d'étude des structures en restauration de sculpture.

Dreux le 13 avril 2009

Sandrine et Benoit Coignard