

-----  
ETUDE PAR SIMULATION INFORMATIQUE

L'anastylose virtuelle de la statue de Ptolémée était prévue dans l'étude préliminaire de Roland et Olivier Coignard d'avril 97 comme partie intégrante de la restauration. Elle reproduisait globalement les procédures que nous avons définies et mises en œuvre pour la restauration de la statue de l'Empereur Auguste du musée d'Arles en 94/95. Eut égard à la dimension inhabituelle de l'œuvre, il s'agissait d'éviter les tâtonnements empiriques et les risques qu'ils engendrent en simulant informatiquement autant que possible les étapes de la restauration afin d'en extraire le maximum de mesures rigoureuses exploitables. L'opération était motivée par une succession d'objectifs distincts qui chacun imposait des spécifications techniques précises pour optimiser la valeur scientifique de l'opération. Suite aux conversations d'août avec M. Albouy nous nous étions engagés à produire un cahier des charges détaillé fixant nos objectifs étape par étape, de la numérisation à la production de résultats mathématiques. Ce fut l'objet d'une étude très précise rédigée en septembre et octobre 97, entre nos séjours aux Etats-Unis et au Japon, et qui fut achevée et communiquée le 5 novembre aux intéressés. Nous y indiquons en quoi cette seconde expérience pourrait améliorer la méthode.

Vu l'arrivée plus que tardive du Colosse en France, nous nous sommes félicités d'avoir effectué cet important travail en amont. En effet, il s'est révélé à posteriori essentiel pour que la restauration puisse être achevée dans les délais. Nous rappellerons dans ce chapitre les prévisions du cahier des charges, et décrirons les procédures mises en œuvre, les résultats obtenus ainsi que les limites de cette première étape de la restauration. Les résultats ont été acquis grâce à la fructueuse collaboration de M. Guillaume Thibault qui a scrupuleusement suivi nos demandes et auquel nous avons transmis notre méthodologie. Nous tenons à le remercier chaleureusement pour les nombreuses séances de travail qu'il a bien voulu nous consacrer. Les limites sont pour parties des ouvertures sur l'avenir et indiquent de nouveaux pas à franchir dont nous décrirons pas à pas les perspectives immédiates. Mais certaines sont malheureusement le résultat du climat de suspicion qui a régit nos rapports avec la direction du mécénat technologique et scientifique d'EDF. Nous ferons état de cette situation regrettable à chaque fois qu'elle explique utilement les lacunes de notre travail, en particulier dans la première partie de cet exposé.

## NUMÉRISATION

Cette première étape conditionnait à elle seule l'ensemble des résultats que nous comptions tirer de l'opération. Il ne s'agissait pas pour nous de produire de simples images de synthèse, mais d'un programme global destiné à renseigner une intervention de restauration particulièrement délicate. La numérisation était en premier lieu un procédé préventif de conservation de la forme. Quelles que soient en effet les précautions mises en œuvre, en regard du volume et du poids de l'œuvre, demeuraient un risque d'altération accidentelle lors de chaque manipulation ou pendant les transports. Ces précautions devaient être prises par égard pour le prêteur en amont de toute intervention.

Le maillage de saisie prévu variait en fonction de la nature des reliefs à relever. Aucun relief n'exigeait un maillage optimum (0,5mm) lequel, à cause de la dimension de l'œuvre allongerait de façon prohibitive la durée de la saisie et produirait des fichiers difficiles à gérer pour la mémoire vive des stations de travail. Pour la forme générale, fortement érodée par la mer, un maillage de 3mm suffisait raisonnablement à rendre compte de l'état actuel de la surface. En revanche, la zone gravée du drapé, qui représente environ 1m<sup>2</sup> demandait un maillage serré de 1 mm ainsi que toutes autres zones (tout détail en creux protégé de l'érosion : plis des lèvres, des yeux, de la coiffe par ex.) qui conservaient des détails de

finesse comparable. En cas d'altération irréversible de la surface, les densités de maillage définies ci-dessus auraient permis la restitution visuellement fidèle des lacunes. Produits par stéréolithographie, des ragréages en pierre reconstituée auraient été obtenus par surmoulage de la résine et appliqués sur la zone lacunaire.

Par ailleurs, nous projetions la réalisation de prothèses compensant les lacunes et l'érosion pour asseoir avec stabilité les pierres les unes au dessus des autres. Il s'agissait ici des zones de cassures pour lesquelles nous prévoyons d'adopter un maillage de saisie de 2mm. L'association des formes de deux surfaces de cassure et la modélisation d'une rive verticale permettent de créer un volume intermédiaire. Cette double semelle réalisable par une machine à commande numérique permettrait d'associer intimement les deux blocs en compensant l'érosion en particulier celle des rives.

Malgré le manque de prise de mesures effectuées sur l'œuvre à l'époque (qui nous avaient contraint à des évaluations visuelles dans le tableau ci-dessous) nous avons évalué à 21 le nombre de points de vue. Le poids des fichiers résulterait du maillage de saisie propre à chaque zone (à l'exception de la couronne pour laquelle nous manquons de quelques éléments). Nous insistions sur la nécessité de procéder à des manipulations de chaque bloc pour donner un accès perpendiculaire à chaque face des blocs pendant la numérisation et indiqué un certain nombre de recommandation technique (doublage de certaines prises de vue après déplacement des élingues de levage ; immobilisation totale d'un bloc suspendu ; détection des zones d'ombre dans les détails creux et si nécessaire, prise d'emprunte par estampage pour une saisie complémentaire sur la surface inversée) pour éviter des défauts rencontrés dans le passé. En ce qui concerne le poids des fichiers et le nombre de triangles résultant des opérations de consolidation nous avons établi le tableau suivant complété aujourd'hui pour comparaison des données réelles (dernières colonnes):

### ÉVALUATION DU RELEVÉ DE POINTS

Le rectangle hauteur/largeur contenant le contour de l'œuvre pour sa plus grande largeur donne d'expérience une surface approchée égale à la moitié du développé de la surface globale.

$(\text{surface}) \times (\text{nombre de faces}) / (\text{maillage}) \times 1000000 = (\text{nombre de points après consolidation})$ .

BLOCS OU ZONES	haut.	larg.	surface	face	points	maillage	nb de points	nb de points après	nb de triangles	%	nombre de triangles
	(m)	(m)									
torse	4,6	2,3	10,6	2	5	3	7 053 333	1 763 333	3 526 667	14%	699 660
drapé	1,2	1,6	1,92	1	1	1	1 920 000	480 000	960 000		
bras	1,25	0,5	6.3e-1	2	3	3	416 667	104 167	208 333	22%	51 603
tête	1	1,8	1,8	2	5	3	1 200 000	300 000	600 000	42%	323 653
détail tête	0,5	0,5	0,25	1	1	1	250 000	62 500	125 000		
couronne											211 219
CASSURES											
tête et cou	0,4	0,4	0,16	1	2	2	80 000	20 000	40 000		
épaule et bras	0,4	0,3	0,12	1	2	2	60 000	15 000	30 000		
jambes	1,5	1,2	1,8	1	2	2	900 000	225 000	450 000		
TOTAUX					21		11 880 000	2 970 000	5 940 000	22%	1 286 135

Nous avons déploré que la numérisation des blocs à Alexandrie, se soit faite précipitamment pendant notre séjour au Japon et avant l'achèvement de notre cahier des charges. La décision fut prise unilatéralement par Marc Albouy et nous fut communiquée juste avant notre départ. Nous espérons que celle-ci fut menée par M. Luc Sergent de Mensi avec lequel nous avons accumulé une longue pratique de la scanérisation de sculpture et qui connaissait nos impératifs techniques. En fait, un autre opérateur a été mandaté, inexpérimenté dans notre domaine d'application. La numérisation, conduite par M.

Brisemeur du Mécénat EDF, a été très sommaire (maillage de saisie maximum de 5mm). Des lacunes importantes, dûes au non-déplacement des blocs, sont à déplorées, notamment à la base de la tête et sur le coté latéral gauche de la couronne. Le poids des fichiers qui en a résulté est en deça de nos prévisions, certes maximalistes. Après modélisation le nombre de triangle de chaque bloc (dernière colonne du tableau) ne représentait plus que 14% de nos prévisions pour le torse, 22% pour le bras et 42% pour la tête dont nous avons sous-estimé les dimensions. C'est donc ce modèle, beaucoup moins défini que ne l'avait été le clone virtuel de la statue d'Auguste qui a servi de base à l'anastylose virtuelle du colosse d'Alexandrie, après le traitement des données.

## TRAITEMENT DES DONNÉES & MODÉLISATION

Le traitement des données permet d'élaborer le clone virtuel. Il consiste tout d'abord à réassembler les multiples fichiers de saisie (les prises de vue de chaque bloc) en un seul référentiel (la consolidation). Il en résulte une densification des points à la jonction des fichiers et, en conséquence un volume de données difficiles à gérer par le processeur pour les manipulations virtuelles, étape suivante du programme qui permettra l'anastylose du Colosse. Les étapes successives font appel à l'appréciation nécessairement subjective, voir interprétative, de l'opérateur, et peut causer des erreurs. Aussi, dans le climat de tension qui prévalait entre nous et mécénat EDF, avons-nous pris le temps de rédiger en détail les recommandations relatives à cette phase de l'opération dans notre cahier des charges, complétées par des conversations téléphoniques avec la Sté Mensi pendant le traitement. Toutes ces précisions quand aux procédures de traitement des données recommandaient naturellement une collaboration étroite entre l'opérateur et le restaurateur, la connaissance de l'objet et des objectifs poursuivis devant présider aux décisions. Malgré le refus du Mécénat EDF de nous associer à cette phase de l'opération effectuée par la Sté Mensi, il semble que notre cahier des charges aient été suivi à la lettre et que cela justifie pleinement le temps que nous avons consacré à sa rédaction. Nous en rappelons les grandes lignes.

1/ L'opérateur élimine les points saisis sur la scène hors de l'objet à numériser. Cette opération est, d'expérience, source d'erreur (élimination accidentelle de points sur la surface de l'œuvre; § la queue du *Centaure*). Lors de la consolidation des fichiers des "trous" peuvent apparaître. Aussi les données de saisies devaient être conservées à toutes fins utiles. 2/ En "consolidant" les fichiers des divers points de vue en un seul référentiel, le choix des fichiers à associer est parfois délicat (§ la consolidation du *Harihara* de Phnom Penh), certaines prises de vue ayant subi des effets parasites (vibration du sol, vent, bruits violents) qui altèrent sa lisibilité. Il importe d'éviter à ce stade le recours à des algorithmes de lissage qui certes atténuent les "bruits", mais altèrent la géométrie réelle de l'œuvre et donc la précision des calculs à venir. Aussi avons-nous recommandé de détecter les fichiers parasites et de les éliminer. 3/ Enfin, la manipulation des objets numériques demande une souplesse qui nécessite l'élimination proportionnelle d'un grand nombre de points. Pour comparaison les fichiers source du torse de l'*Auguste* pesaient près de 2 millions de points ; modélisés ils ne pesaient plus que 425 000 points. La réduction des données au quart voir au cinquième des fichiers source nous semblait donc être un compromis raisonnable pour la production de clones aisément manipulables (environ 280000 points ; soit 560000 triangles environ pour les 4 blocs réunis). 4/ Une référence aux fichiers lourds pour des zones précises (plan de cassure par ex.) devait être maintenue afin qu'ils puissent être appelés au cours de la manipulation pour une comparaison plus précise. 5/ Enfin, c'est la traduction des fichiers de points SOI au format IPS (surfaçage du nuage de points par une multitude de triangles vectorisés pour visualiser le clone) qui permet d'apprécier la pertinence des choix d'économie de données en fonction du niveau de résolution souhaité pour le remontage virtuel. Un aller et retour critique entre l'allègement progressif du nombre de points et la génération de triangle devait permettre de fixer le résultat en fonction

des impératifs du traitement à venir.

## ANASTYLOSE VIRTUELLE

Nous avons regretté, au cours du remontage virtuel de l'*Auguste*, une limite actuelle du logiciel Ipsos. Aussi avons-nous espéré que l'anastylose du Colosse serait l'occasion d'améliorer la méthode, et proposé à EDF de soutenir le développement d'un outil logiciel dédié à cette application particulière. C'eut été l'occasion d'une véritable opération de mécénat technologique. De quoi s'agissait-il ? Les clones numériques ont, à la différence d'objets réels, la regrettable propriété de s'interpénétrer. Cet inconvénient tient au fait que le logiciel ne simule pas le heurt d'objets numériques comme c'est le cas d'objets réels. Cette propriété est cependant très attendue pour le remontage virtuel d'œuvres fragmentées et plus encore pour l'anastylose de monuments. Une autre propriété essentielle est l'analyse du degré de similitude entre les zones de cassures pour permettre d'apprécier logiquement l'association de deux fragments entre eux et d'effectuer des collages virtuels (magnétisation & verrouillage). Le développement de ces deux modules, dont nous avons à plusieurs reprises discuté les normes avec la Sté Mensi, était décrit dans notre cahier des charges mais n'ont pas été jugés utiles par le Mécénat EDF.

Au traitement des données par la société Mensi a donc suivi une tentative de montage virtuel initiée en toute indépendance par le Mécénat EDF et effectuée par M. G. Thibault avec le logiciel de réalité virtuelle, Device. L'idée était en soit intéressante puisque ce logiciel comprend un outil sommaire de détection d'accostage entre les blocs. M. Thibault, qui comprenait bien l'utilité de notre demande pour des développements complémentaires, a donc pensé contourner le refus de sa direction en transférant les fichiers IPS du Colosse dans cet autre logiciel. Le résultat de son travail, présenté à J.Y. Empereur et à nous-même le 19 décembre 97, était intéressant sur le plan de l'image de synthèse, comme le prouve l'usage qui en a été fait dès le mois de janvier dans les médias ainsi que sur le stand EDF de l'exposition Electra. Malheureusement, l'anastylose proprement dite (c'est à dire l'association exacte des blocs entre eux) et des calculs mathématiques qui devaient en découler ne pouvaient pas être effectués sur le logiciel en question. Nous avons eu quelques difficultés à faire admettre à nos partenaires que ces résultats étaient, certes fort beaux, mais scientifiquement inexploitable, et qu'il faudrait recommencer l'anastylose à la base, à partir des clones de blocs produit par Mensi, dans le logiciel Ipsos et en suivant notre méthodologie habituelle. Ce travail a donc été effectué au mois de février/mars 98 par Benoit Coignard et Guillaume Thibault au centre de Clamart, en attendant l'arrivée du Colosse.

Nous avons restitué la position des blocs entre eux par une méthode relativement empirique mais rigoureuse qu'il convient de décrire brièvement. Celle-ci exploite deux approches complémentaires : le réglage des surfaces sculptées et l'interpénétration des zones de cassures. La première utilise des vecteurs en tant que règles pour aligner les surfaces de l'épiderme de la statue. La seconde consiste à contrôler visuellement le "moment" de l'interpénétration entre deux blocs. Un bloc virtuel est "creux" ; il définit une surface fermée visualisable de l'intérieur comme de l'extérieur. Nous donnons à chaque bloc une couleur distincte. Les zones de cassure sont isolées par la suppression partielle et temporaire de la majeure partie du reste de la surface du bloc. Nous prenons comme exemple le cas de l'association torse/bras. Le bloc A (torse) est fixe. Le bloc B (bras) est positionné près du bloc A dans une position approximative. Il est ensuite approché pas à pas dans un axe x perpendiculaire au plan de cassure, jusqu'à ce que l'interpénétration soit détectée par une tache de couleur différente sur la face interne de la zone de cassure. La progression de la pénétration des blocs renseigne sur les défauts d'orientation du bloc B par rapport au bloc A dans les axes y et z. Cette position est corrigée jusqu'à ce que les plans de cassure s'accostent simultanément en trois points extrêmes de la surface de cassure (un pas

de plus dans l'approche du bloc B, et la zone d'interpénétration correspond à la surface de cassure). Les plans moyens des zones de cassure des deux blocs sont à ce stade globalement parallèles. Reste à vérifier le réglage des surfaces sculptées. Des coupes perpendiculaires au plan de cassure sont pratiquées en plusieurs endroits pertinents (où est conservé l'épiderme original). Les profils des surfaces de l'œuvre doivent coïncider à la jonction des blocs, et ce, pour chaque coupe simultanément. Les règles vectorielles, ou, à défaut, des règles matérielles plaquées sur l'écran, sont alors utilisées et révèlent de légers décalages. Leur correction se fait sur le bloc B dans les trois axes : par un pivotement sur l'axe x, et/ou un déplacement en y et/ou en z. Après correction, il faut vérifier à nouveau que l'interpénétration des deux surfaces est toujours aussi soudaine et globale (à l'exception des lacunes et fortes usures évidemment). Un aller et retour entre les deux approches a permis de restituer précisément la position originale des blocs entre eux, dans le cas du bras au centimètre près, ce qui est appréciable pour une statue de cette taille (1/700ème de précision sur la hauteur).

Cette méthode a donné d'excellents résultats pour l'association du torse et du bras, les surfaces et les rives de cette cassure récente étant peu érodées et la numérisation étant suffisamment précise dans cette zone. Il n'en a pas été de même pour l'association torse/tête et tête/couronne. Dans l'association tête/torse en effet la base de la tête n'ayant pas été numérisée (la surface a donc été grossièrement générée par le logiciel pour fermer le bloc) il a fallu se fier essentiellement aux données de l'épiderme de l'œuvre. C'est donc la méthode des règles qui a été utilisée. L'impossibilité de vérifier la coïncidence des plans de cassure nous a privé d'une preuve de l'exactitude de la position à laquelle nous nous sommes arrêtés. Fort heureusement, la statue de Ptolémée comprend un pilier dorsal qui définit la verticalité de la statue sur deux plans perpendiculaires entre eux et à l'horizon. Cette particularité a, non seulement permis de verticaliser le torse sans risque d'interprétation en l'absence de sa base, mais a servi de référence pour aligner la tête et la couronne respectivement au torse. La largeur du pilier, constante sur le torse (790mm), décroît à l'approche de la tête et suit une légère courbe jusqu'à l'extrémité de la couronne. Nous avons postulé que la largeur du pilier décroissait symétriquement (comme nous le verrons plus loin, les prises de mesure sur le modèle numérique comme sur la statue nous ont révélé une symétrie remarquable du débit global de l'œuvre). L'association tête/couronne posait d'autres problèmes. D'une part, les surfaces de cassures comportent des lacunes et sont extrêmement érodées sur la couronne ce qui engendre un faible degré de similitude entre les deux surfaces. D'autre part, la surface latérale gauche de la couronne (sur laquelle reposait le bloc dans la réserve d'Alexandrie) n'a pas été numérisée. Elle a été l'objet d'une restitution approximative lors de l'opération de consolidation. En conséquence l'application d'un calcul de symétrie à la décroissance du pilier dorsale, certes très vraisemblable, demeure interprétative et n'a pu servir de vérification à la coïncidence entre les surfaces de cassure du fait de l'usure des deux blocs. L'association tête couronne est, malgré nos efforts, la moins précise de l'anastylose virtuelle de la statue de Ptolémée.

## CALCULS FONDÉS SUR L'ANASTYLOSE DU COLOSSE

Depuis la consolidation nous connaissons le volume de chaque bloc, soit : le torse 6,22335m<sup>3</sup> ; le bras 0,249m<sup>3</sup> ; la tête 0,95m<sup>3</sup> (environ) ; la couronne 0,87m<sup>3</sup> (environ ; imprécisions dûes aux lacunes de la numérisation). Les centres de gravité avaient aussi été calculés à ce stade du travail. Nous avons évidemment estimé sur ces données le poids probable des blocs à partir d'une densité maximum du granit par sécurité, soit 2,8/m<sup>3</sup> ; ce coefficient donnait les résultats suivants : torse 17,42 tonnes ; tête 2,67 ; couronne 2,47 ; bras 0,697. Ces mesures seront ultérieurement corrigées à l'arrivée de l'œuvre, tout d'abord par la pesée du bras, puis par la mesure de la masse volumique de 14 prélèvements sur les carottes de percement qui donnent une moyenne de 2,675 tonne/m<sup>3</sup> (les poids

corrigés par ce coefficient de densité moyen du granit sont respectivement de : torse 16,647 tonnes ; tête 2,556t ; couronne 2,347t ; bras 0,666t). Après l'anastylose, nous avons complété ces calculs primitifs en additionnant les volumes tête/torse, torse/bras, tête/couronne, tête/couronne/torse, tête/couronne/torse/bras et calculé les centres de gravité respectifs de ces associations. Nous avons ensuite projeté les centres de gravité de chaque bloc et des blocs associés sur un plan représentant le sol (situé 2m plus bas que le point le plus bas du torse en évaluation hypothétique de la hauteur des jambes et de la base). On comprendra aisément que ces axes matérialisent le point d'équilibre des forces exprimées sur la partie inférieure (bloc ou socle) par les blocs associés. Nous n'avons pas encore déterminé à l'époque la technique de montage sur le lieu d'exposition. Deux hypothèses concurrentes étaient envisageables ; soit le Colosse serait assemblé en atelier, puis démonté, transporté et réassemblé in-situ en position verticale ; soit il serait assemblé, conditionné et transporté en position horizontale puis relevé sur le lieu d'exposition en un ensemble solidaire. Ces calculs s'avéraient très importants pour apprécier l'équilibre de la statue selon l'ordre d'empilement des blocs dans l'hypothèse d'un assemblage vertical.

Les distances relevées entre les axes de gravité projetés sur le plan de l'horizon donnaient les mesures suivantes : tête/torse 117,26mm ; tête/couronne 117,04mm ; torse/couronne 63mm ; torse/bras 974mm. Mis à part le bras dont le faible volume a peu d'incidence sur la statique de l'ensemble, les axes projetés des centres de gravité sont contenus dans un triangle ténu dont les cotés n'excèdent pas 12cm, 12cm et 7cm, situation favorable à l'équilibre des volumes. La principale difficulté prévue par ces calculs pour le montage réel concernait la position de l'axe vertical du centre de gravité tête/couronne qui passait dans la zone lacunaire de la tête et exprimait donc un important porte-à-faux. Un autre porte-à-faux se manifestait logiquement pour l'assemblage du bras sur le torse. Enfin, la fusion des trois volumes (tête, corps et bras) a permis de calculer l'axe de gravité global de l'œuvre remontée. Celui-ci passant dans le vide situé entre les deux jambes et le pilier dorsal, se trouvait cependant contenu dans le polygone de sustentation de l'œuvre. Nous ne savions toujours pas à l'époque si la base de la statue serait retrouvée à temps pour l'exposition. Il fallait cependant envisager cette éventualité soit pour le Petit-Palais, soit pour un avenir plus lointain. En conséquence l'axe projeté du centre de gravité total passerait nécessairement dans une zone de vide à la base dont on s'attendait à ce quelle soit lacunaire, voir brisée en plusieurs morceaux. Les quelques 23 tonnes estimées seraient donc réparties sur une surface érodée, restreinte, voir mutilée.

Pour reproduire dans la réalité la position des blocs déterminée par l'anastylose virtuelle, nous avons défini une droite S verticalement alignée au dos du pilier dorsal en son centre et sensée matérialiser l'axe central de la statue vue de face. Les mesures prenaient cette référence comme point zéro de l'axe x (gauche droite) et de l'axe y (profondeur). Cet ligne allait passer à égale distance entre les deux rails du système de chariots alors en cours de réalisation à l'atelier. Des mesures hors-tout de chaque bloc et des blocs associés ont aussi été produites qui ont servi à déterminer la largeur utile des chariots et l'espacement des rails, la dimension de leur plateau et des cadres de maintien et, par la suite à la conception de la cage de transport et de levage de la statue.

Enfin la verticale passant par le centre de gravité de la couronne déterminait dans notre projet l'axe de percement du goujon d'assemblage de la tête et de la couronne et la verticale passant par le centre de gravité tête/couronne déterminait l'axe de percement pour introduction du goujon entre la tête et le torse. Le positionnement des inserts métalliques sur ces axes était un choix délibéré, l'objectif étant d'annuler les efforts en torsion sur les goujons pour minimaliser leur diamètre et donc celui des trous à percer dans la pierre. Le poids passant rigoureusement dans cet axe, la statique de l'œuvre est théoriquement assurée par ces seuls éléments. D'un point de vue purement théorique, et en l'absence de tout facteur destabilisant (vents par ex.) ou de limite de résistance à la compression du granit en poinçonnement (concentration du poids tête/couronne sur un goujon de 3,5cm de diamètre

; soit 10,99cm<sup>2</sup>) la statue pourrait tenir debout. Nous proposons, sur la base de table de calcul traditionnel, des diamètres de goujon de 3,5cm pour l'association tête/torse et 3 cm pour l'assemblage tête/couronne. Les mesures de résistance à la compression que nous avons demandées au CEBTP ont été effectuées plus tard sur les carottes extraites des trous de goujons, ont confirmé la fiabilité du projet puisque les résultats de résistance à la compression simple sur 5 tests se situent entre 108,6Mpa et 126,1Mpa ; la moyenne se situe à 120,5Mpa mais nous avons retenu la mesure la plus basse par sécurité ; soit une résistance de 1080 kilogramme au cm<sup>2</sup> qui permet amplement la tenue du poids additionné tête/couronne (5,14 tonnes) sur un goujon de 10,99cm<sup>2</sup> de section (capacité théorique = 11,869 tonnes). Ces calculs étaient évidemment relatif à la qualité du granit dans les zones de percement. Une veine fragile aurait remis en question notre projet, nous contraignant à déporter l'axe de percement hors le point d'équilibre et donc à augmenter le diamètre des inserts en conséquence. C'est la raison pour laquelle nous avons programmé et effectué avec le CEBTP, en préalable à toute intervention une mesure de la vitesse de propagation des ondes ultra sonores dans le granit dans tous les axes critiques dès l'arrivée de la statue (voir plus loin). Des mesures complémentaires ont été demandées au CEBTP concernant la résistance au cisaillement des inserts métalliques destiné à supporter le bras à sa jonction avec le torse afin d'en déterminer le diamètre minimum nécessaire.

Afin de pouvoir reproduire sur la statue le point de passage de ces verticales théoriques sur les surfaces de cassure, nous avons détecté sur le modèle numérique un petit nombre de "points pertinents". Ceux-ci devaient nous permettre de reporter au compas des mesures précises sur le bloc réel. Au nombre de six, ils se situaient à la commissures des lèvres, des yeux et à l'orifice des oreilles. Les distances entre ces six points pertinents et chaque points d'intersection entre les axes verticaux et les surfaces de cassures ont été précisément mesurées.

Enfin, certains résultats nous ont surpris et apporté un regard nouveau sur la rigueur géométrique avec laquelle les égyptiens ont débité symétriquement ce bloc cyclopéen. Ainsi avons-nous déterminé la droite S au dos du pilier, axe central de la statue. Vu de face, le centre de gravité du torse passe en x à +58mm de la droite S (la largeur totale entre les épaules de 2396mm, soit 1/40ème). De même, la position du nombril se trouve-t-elle à +30mm de l'axe S. La mi-distance entre les deux yeux est à moins de 5mm de l'axe S ainsi que celle de la commissure des lèvres. Les distances entre les points pertinents et les axes de percement des goujons corroborent brillamment cet état de fait. Ces résultats sont tout à fait remarquables et mériteraient à eux seuls une étude approfondie qui donnerait des indications sur la méthode géométrique de débit utilisée par les sculpteurs égyptiens.

## LA MODÉLISATION DES PROTHÈSES

Pour faire coïncider le remontage virtuel et le remontage réel, un positionnement des blocs à partir des mesures hors-tout relevées sur le modèle numérique et contrôlé par des impressions d'écran pour les quatre faces de chaque jonction constituait une approche approximative sujette à des erreurs probables. Cette statue manque en effet de points pertinents en nombre suffisant (mis à part la tête) pour reconstituer rigoureusement la position relative des blocs entre eux par triangulation ; en conséquence le report des axes de gravité et les mesures techniques qui en résultaient, serait sensiblement différents du modèle numérique. Au vue du poids de l'œuvre, ces légères différences pouvaient avoir une incidence non négligeable. Il est aisément compréhensible que les lacunes, qui constituent des vides, tant sur le modèle virtuel que dans le réel, auraient gagné à être matérialisées par des semelles "moulées" aux deux surfaces de cassures à associer. La modélisation de prothèses virtuelles, destinées à être réalisées sur des machines à commande numérique, et donc épousant en négatif l'emprunte de deux blocs à associer, garantissait au contraire la coïncidence du modèle virtuel et du réel. En outre elles permettraient d'appréhender

précisément en amont et en fonction des positions des goujons, la surface mini-maxi du polygone de sustentation à matérialiser par une semelle pour répartir au mieux les efforts à supporter par la pierre tout en minimalisant son impact visuel pour des raisons esthétiques évidentes. La matérialisation de la semelle aurait été dans ce cas soit, produite en stéréolithographie, puis surmoulée et coulée en ciment de résine, soit débitée par fraisage dans un bloc de résine de haute densité, soit encore (pour les 23 tonnes de la base en particulier) découpées au laser couche par couche dans de la tôle d'acier de 1mm d'épaisseur et le volume reconstitué par empilement des couches sur des tenons de centrage. L'avantage final de la démarche était aussi d'avoir des éléments indépendants démontables et réutilisables pour son remontage en Egypte ou toutes autres expositions ultérieures.

Le surcoût probablement important de ce projet, mais aussi le manque de temps, nous ont contraint à renoncer en partie à ce programme logique et novateur qui aurait tracer un lien direct entre la restauration simulée informatiquement et sa concrétisation. Nous en avons cependant amorcé l'étude au cours des longues heures de travail passées avec Guillaume Thibault, séduit lui aussi par notre projet et convaincu de son utilité. A partir de forme simple - vecteurs cylindriques concentriques aux axes projetés des centres de gravité - traversant les deux volumes à associés, nous avons isolé expérimentalement un volume intermédiaire productible par les procédés cités plus haut.

## -VI - STRUCTURE DE SOUTIEN

Pour garantir la sécurité de l'œuvre et celle du public, nous avons projeté dans l'étude préliminaire, une structure de soutien constituée par l'adjonction d'une potence arrière ajoutée au pilier dorsal qui prévoyait les différents cas de figure dont l'hypothétique découverte de la base. Si la base avait été retrouvée dans les délais, les mêmes procédures aurait été appliquées à son remontage en association avec les trois autres parties, à savoir : numérisation, modélisation, recherche de coïncidence, calcul de résistance, modélisation de la semelle intermédiaire,...etc. Dans cette perspective, une étude originale a été initiée pour mesurer dans le matériau granit l'incidence des efforts à supporter par les jambes et le pilier dorsal. Pour résoudre les questions que nous formulions, M. Guillaume Thibault a proposé d'utiliser le logiciel Aster qui permet de visualiser par un dégradé de couleur allant du bleu au rouge la croissance des pressions supportées par la pierre. Le modèle numérique a donc été importé dans ce logiciel pour une analyse sommaire mais déjà fort révélatrice. Si les efforts supportés à la jonction couronne/tête et tête/torse était comme on s'en doutait, fort supportables, en revanche sur la base du torse la coloration virait à l'orange vif trahissant des pressions extrêmement fortes. Nous avons acquit la conviction, au cours des quelques séances de travail sur ce sujet, que cette étude aurait pu donné des résultats de pertinence accrue (pour les efforts dûs à la présence de goujons dans le corps du matériau par ex.). Elle est à nos yeux exemplaire de ce qu'il conviendra d'explorer à l'avenir pour faire face sur des bases rationnelles à ce type de problématique.

A défaut de jambes et d'une base complète et stable, une base de soutien de forme sobre avait été imaginée pour asseoir le corps à une hauteur restituant visuellement le volume absent. Bien qu'une hauteur maximum eut été souhaitable pour réincorporer la base réelle dont la découverte demeure vraisemblable, elle posait des problèmes esthétiques et d'équilibre statique (aggravation du mouvement pendulaire en cas de vent violent). Nous l'avons pour notre part estimée à un minimum de 2m et fixée expérimentalement à ce minimum sur le modèle numérique en dessous du point le plus bas du torse. Cette hauteur a par la suite été l'objet de discussion avec les conservateurs égyptiens, puis avec J.Y. Empereur, et d'estimations contradictoires liées aux diverses hypothèses de forme de la base. Comme nous n'avons développé plus haut, d'un point de vue théorique et dans des conditions de présentation protégée, il était envisageable que la

potence arrière puisse être évitée (puisque l'axe de gravité global des trois parties hautes passait au centre du polygone de sustentation constitué par les jambes et le pilier dorsal) ; La création de semelles intermédiaires augmentant l'assise des blocs prêchait en faveur de cette hypothèse ; un montage libre, par simple empilement/emboîtement des différentes parties aurait évidemment été la solution la plus élégante. Cependant, la faible dimension de l'assise du torse ainsi que sa forme particulière et l'importance des pressions accumulées sur cette zone auraient demandé une étude de faisabilité plus poussée que le logiciel Aster nous permettait d'entreprendre. Cette réflexion est cependant demeurée sans suite, la présentation en extérieur prévue pour l'exposition parisienne, comme les risques sismiques au retour de l'œuvre en Égypte interdisait de l'envisager. L'étude numérique nous a donc permis de formaliser visuellement le modèle de chaise et de potence que nous avons envisagé dans l'étude préliminaire pour une meilleure appréciation esthétique du projet. Le modèle de chaise a été en particulier modélisé pour déterminer la surface minimum à envisager pour asseoir le volume. A été examiné l'emboîtement des moignons érodés des deux jambes pour éviter un glissement vers l'avant de la statue. De ce concept est directement issu la forme particulière de la chaise et la coulée du béton d'assise.

La résistance aux effets du vent sur la stabilité de l'œuvre aurait aussi pu être l'objet d'une étude informatique globale en introduisant le Colosse numérique dans une soufflerie virtuelle telle qu'en utilise l'industrie aéronautique. Cette étude aurait sans aucun doute donné des résultats de haute pertinence en tenant compte de l'aérodynamisme de la forme. A défaut, nous avons produit des projections planes de la face et du profil de la statue remontée et de chaque bloc pour calculer les surfaces de prise au vent. Ces mesures ont permis au CEBTP d'effectuer une étude sur la sécurité de l'œuvre en cas de tempête (voir rapport de M. Fourné) par les méthodes d'ingénierie traditionnelle.

Enfin, un dernier axe de recherche est resté en suspens qui présente pourtant un grand intérêt pour la conservation de l'œuvre dans son pays d'origine. Les risques encourus du fait de l'instabilité sismique de la région y sont en effet d'importance. L'importation du modèle numérique de la statue et du fichier en CAO de sa structure porteuse dans un logiciel de simulation de séisme permettrait d'évaluer le seuil critique de résistance de chaque élément de l'assemblage. Nous craignons en effet que la flexibilité de la potence (constatée lors de l'assemblage au sol) favorise la propagation d'ondes destructrices dans les IPN et leur torsion (§ bâtiments de structures acier suite au séisme de Cobé) ainsi que la rupture des fixations métalliques des blocs entraînant leur chute. Nous avons conçu récemment un principe de socle anti-sismique qui isolerait la statue des mouvements horizontaux d'un tremblement de terre et en neutraliserait les effets. Le procédé est a priori simple à mettre en œuvre. Une étude par simulation serait, là encore, indispensable pour définir les contraintes propres de l'ouvrage relativement à l'amplitude des phénomènes sismiques enregistrés en Égypte afin de déduire les modalités d'adaptation de notre principe de socle anti-sismique aux particularités de l'œuvre et de son support.

Nous sommes donc loin d'avoir épuisé le potentiel de cette expérience tant pour la restauration que pour connaissance et la conservation de l'œuvre. Nous souhaitons vivement que ces divers axes de recherche engagés à l'occasion de l'anastylose virtuelle de la statue de Ptolémée, et pour la plupart interrompu faute de temps, puissent être à l'avenir menés à leur terme. L'occasion pourrait en être la découverte des jambes et de la base et/ou l'installation de l'œuvre à Alexandrie. La démarche globale que nous proposons, intégrant des processus de simulation appliqués aux données réelles de la volumétrie d'un objet d'art numérisé, à la connaissance du matériau et à l'évaluation des procédures de restauration, est en mesure de fournir aujourd'hui des résultats de haute pertinence susceptibles de faire évoluer substantiellement la pratique professionnelle.

Dreux, le 5 juin 99  
Benoit Coignard