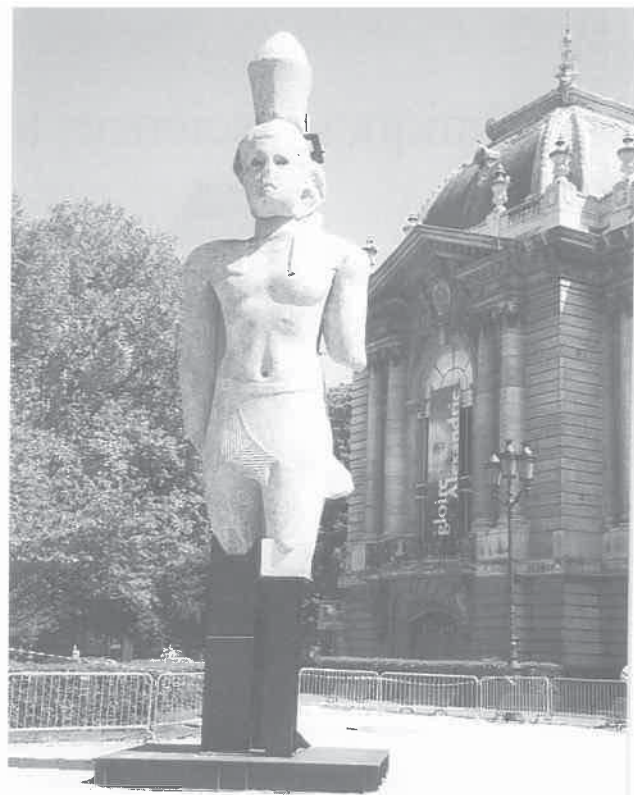


le colosse d'alexandrie

remontage de la statue de Ptolémée

Michel Paramythioti
Fondateur de MENSI – Conseiller technique



1 – UN PEU D'HISTOIRE : LE PHARE

Lorsqu'Alexandre décida de la construction d'ALEXANDRIE en 331 av. JC, il n'imaginait pas qu'il ne la verrait jamais ; ce fut l'un de ses compagnons, Ptolémée, qui devint roi d'ÉGYPTE à sa mort en 323 et fonda la dynastie des Lagides qui devait régner plus de 300 ans.

Sur les grandes lignes définies par Alexandre (tracées dans le sable ?), Ptolémée I^{er} et son architecte Dinocrate de Rhodes se lancent dans une réalisation proprement pharaonique : construction de murailles, de grandes artères, d'un circuit d'alimentation en eau potable, d'un hippodrome, etc. : il va faire d'Alexandrie le carrefour du commerce méditerranéen, mais aussi un pôle culturel et scientifique majeur du monde hellénistique.

La puissance économique et maritime d'Alexandrie n'eut d'égale que la splendeur et le raffinement de la civilisation qui s'y épanouit sous cette tumultueuse dynastie. En effet, les Ptolémée permirent grâce à une politique très habile l'hellénisation du pays et le maintien des an-

ciennes coutumes pharaoniques, d'où une synthèse originale et féconde de la culture égyptienne et de la culture grecque.

Parmi les réalisations grandioses dues à Ptolémée I^{er} et à son successeur Ptolémée II, trois d'entre elles ont laissé un souvenir majeur dans l'Histoire des hommes :



– Le Musée, synthèse de la culture artistique de l'époque.

– La Grande Bibliothèque, qui recensa probablement plus de 50 000 volumes.

– Le Phare, qualifié de 7^e Merveille du Monde par les voyageurs de l'époque.

L'épopée de la dynastie des Ptolémée s'achève avec la bataille d'Actium contre Octave (31 avant J.-C.) et le suicide de Cléopâtre : Alexandrie perd son pouvoir politique mais demeure une cité commerciale et un centre intellectuel importants jusqu'à la conquête par les Arabes en 641 : Alexandrie n'est plus désormais qu'un port de transit situé aux marges du pays.

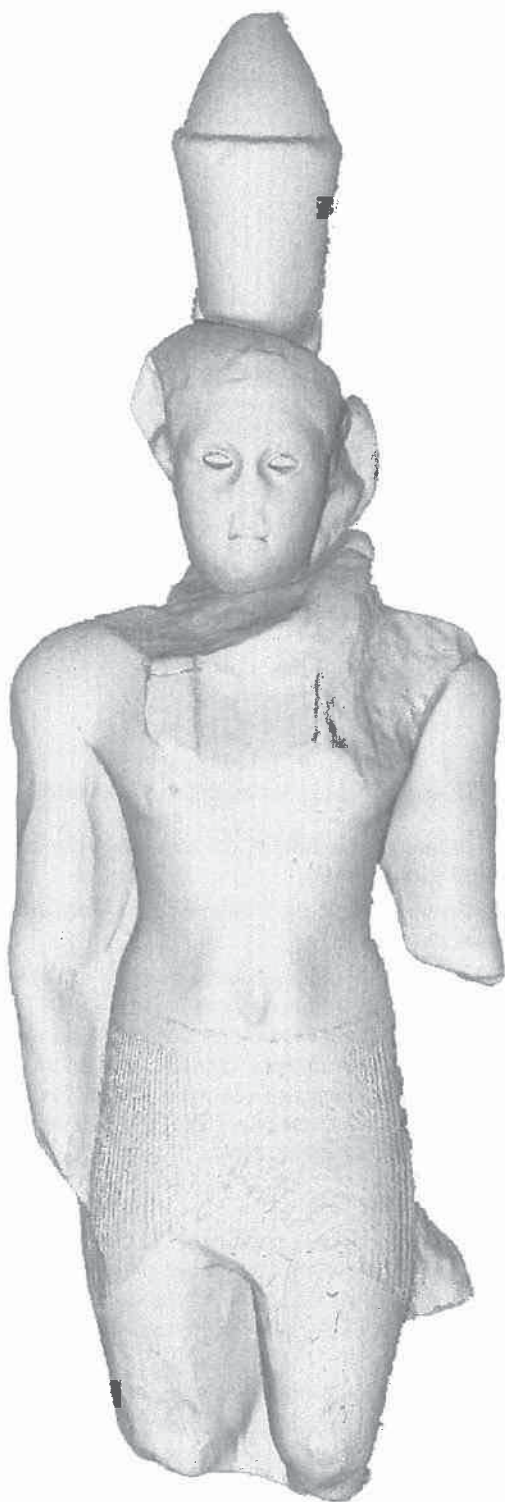
Le Phare d'Alexandrie

Les nombreux écueils qui longent la côte de ce grand pôle maritime constituent un danger permanent qui nécessite un repère visible de loin capable de guider les marins : le site choisi sera l'île de Pharos qui donnera son nom à l'édifice.

La construction du Phare est engagée par Ptolémée II (308-246 avant J.-C.) vers 297 ; le monument sera inauguré vers 285 et impressionnera tous ses contemporains.

Cette tour énorme, comportant trois étages, est une véritable prouesse architecturale : le premier étage, de plan carré, s'élève sur environ 70 mètres ; il est surmonté d'un second étage, de plan octogonal, haut de plus de 30 mètres, puis d'un troisième étage cylindrique qui mesure 9 mètres et est surmonté d'une statue de Zeus : au sommet de cette tour gigantesque, un feu est entretenu et amplifié par un système de miroirs.

Au pied du phare se dressent trois couples de souverains aux dimensions colossales : il s'agit de rois représentés en Pharaons ainsi que leurs épouses assimilées à Isis : ils sont le symbole de la volonté des Lagides d'associer leur image au monument symbolique de la cité et



d'affirmer qu'ils sont des souverains de l'Égypte éternelle.

Après plusieurs séries de séismes au cours de l'Histoire, le Phare d'Alexandrie est définitivement détruit par un tremblement de terre doublé d'un raz-de-marée le 8 août 1303 : il disparaît alors curieusement du souvenir des hommes au point d'être assimilé à une légende.

Les Fouilles de 1995

Les Égyptiens savaient depuis longtemps qu'il y avait des vestiges sous la mer dans le port d'Alexandrie, mais

le site de l'île de Pharos étant zone militaire, l'accès était très difficile ; une statue colossale de la déesse Isis avait pourtant été remontée dès 1961, puis une expédition menée à l'initiative de l'Unesco en 1975 avait permis à une archéologue et plongeuse britannique, Honor Frost, de publier un rapport décrivant le site sous-marin et ses vestiges.

Les événements s'accélérent lorsque les autorités Égyptiennes engagent en 1993 la construction d'un brise-lames au large du fort de Qait bay, situé sur l'île de Pharos, en immergeant des centaines de blocs de béton de 20 tonnes : sous la pression des médias et de la Communauté Internationale, la construction est interrompue sur décision du Président Moubarak ; des crédits sont dégagés grâce à la ténacité de Nicolas Grimal, directeur de l'Institut Français d'Archéologie Orientale (IFAO) et la plus importante campagne de fouilles sous-marines qu'ait connu le site peut démarrer.

Ces fouilles sont menées par le Centre d'Études Alexandrines (CEA) et dirigées par son directeur Jean-Yves Empereur avec le concours actif de deux égyptologues éminents de l'IFAO, J. P. Corteggiani et G. Soukassian : après des plongées de confirmation en 1994, l'aventure débute en 1995 avec des moyens importants fournis par diverses fondations (EDF, ELF, Antenne 2, Gédéon, la BNP, etc.).

2 – LE COLOSSE : L'ANASTYLOSE VIRTUELLE

Les fouilles de 1995 conduisent à confirmer la présence par 10 mètres de fond d'un ensemble de blocs énormes ayant appartenu au phare qui sort ainsi de la légende : elles vont également permettre de sortir de l'eau deux vestiges importants qui constituent le sujet de notre étude : une tête et un torse masculins colossaux en granit d'Assouan que les archéologues vont aussitôt rapprocher de deux autres pièces récupérées sur le même site dans les années 70, un bras gauche et une couronne également colossaux : l'opinion de J. Y. Empereur est qu'il s'agit de Ptolémée II dit "Philadelphie" par qui le phare a été construit.

Le problème qui se pose alors est d'abord de confirmer que ces quatre pièces appartiennent bien à une même statue, puis de les réassembler afin de reconstituer au mieux la statue originale, le but étant de l'exposer dans le cadre de l'exposition "La Gloire d'Alexandrie" organisée par "PARIS MUSÉES" en mai 1998 à Paris : du fait des nombreuses "lacunes" et de l'érosion due au long séjour sous-marin, il est en effet impossible de procéder par "réemboîtement" des zones de fracture.

Les pièces concernées soulèvent une difficulté majeure liée à leur poids (d'abord nettement sous-estimé par les archéologues) qui pose de gros problèmes de manutention :

- 17,5 tonnes pour le torse
- 3,5 tonnes pour la tête
- 2,5 tonnes pour la couronne
- 700 kg pour le bras gauche

L'assemblage de blocs de plusieurs tonnes présente des difficultés importantes : il faut libérer les archéologues et les restaurateurs des contraintes de taille et de poids pour parvenir à trouver l'agencement optimal des 4

blocs les uns par rapport aux autres ; le remontage réel d'une statue est déjà une opération délicate pour des fragments de quelques dizaines de kilos, elle devient aléatoire avec des blocs de plusieurs tonnes.

Devant l'ampleur des difficultés, un des commissaires de l'exposition de Paris, également conservateur du Musée d'Arles, Alain Charron, se souvient d'une opération réalisée à Arles en 1995 pour le remontage d'une statue colossale de l'empereur Auguste et suggère d'avoir recours au même procédé de modélisation numérique et simulation.

Aussitôt contactée, la société familiale Coignard, spécialisée dans la restauration des statues pour les Musées Nationaux, effectue une première visite à Alexandrie en mars 1997 pour prendre la mesure du problème et proposer des solutions : les Coignard avaient été confrontés au même problème (à échelle moindre, fragments de l'ordre de la tonne) pour la restauration de la statue d'Auguste et avaient alors, en accord avec Alain Charron, pris contact avec la société MENSİ, qui développait un système de relevés 3D par balayage laser capable de créer des "clones" numériques d'objets ou d'installations pour permettre en particulier à EDF de développer les techniques de simulation dans la maintenance des centrales nucléaires.

Ce contact établi avec MENSİ en 1994 devait s'avérer fructueux : il s'agissait de transférer au domaine culturel une technologie nouvelle développée pour la grande industrie ; chargés par le Musée d'Arles de la restauration de la statue d'Auguste constituée de plusieurs fragments (et perplexes sur les moyens à mettre en œuvre), les Coignard séduits par ces nouvelles possibilités allaient convaincre le musée d'Arles de tenter l'aventure et le Crédit Agricole local de la financer : il s'agissait en effet d'une première mondiale d'assemblage virtuel des pièces d'une statue comme moyen de préparation et d'optimisation de l'assemblage réel à effectuer.

Cette opération devait se dérouler avec succès au début de 1995 et permettre la mise au point de la méthode d'anastylose virtuelle qui consiste à :

- Relever par un scanner 3D des "nuages de points denses" sur les différentes pièces,
- Bâtir à partir des points un "modèle numérique" de chacune des pièces,
- Réaliser l'assemblage virtuel optimum des modèles numériques obtenus.
- Sortir de l'assemblage virtuel réalisé les informations nécessaires à l'assemblage réel.

Grâce à ce procédé, le remontage de l'Auguste allait se dérouler dans les meilleures conditions et servir de référence pour le remontage du Colosse d'Alexandrie ; il allait également conduire les Coignard à développer le concept d'"infosculpture" qui ouvre les portes à ces techniques sur nombre d'autres applications culturelles.

Comme la Fondation EDF participait déjà au financement des fouilles, il apparut tout naturel aux restaurateurs de proposer à Paris Musées de s'adresser pour le financement de l'opération Colosse au Mécénat Technologique EDF : son directeur M. Marc Albouy accepta volontiers de soutenir un projet aussi prestigieux et de convaincre les autres partenaires, car il avait acquis auparavant sur d'autres applications (grotte Cosquer)

une bonne connaissance du procédé SOISIC-3Dipsos développé par MENSİ avec le concours d'EDF : il allait financer les opérations de saisie sur site et de simulation numérique telles qu'elles sont décrites ci-dessous.

3 – SAISIE SUR SITE ET MODÉLISATION

Les 4 fragments (supposés) du colosse ayant été rassemblés dans la cour du fort de Qait bay, il a fallu amener sur place le capteur SOISIC : il s'agit d'un scanner 3D par balayage laser capable de mesurer avec une grande précision (erreur inférieure au mm à 5 m) et une grande vitesse de saisie (100 points par seconde) la surface d'objets complexes et de grandes dimensions. Les géométries réelles sont ainsi enregistrées très fidèlement dans la mémoire de l'ordinateur ; cet appareil a déjà été décrit en détail dans ces colonnes (XYZ n° 63).

Les opérations de relevés ont été réalisées dans la cour du fort par un opérateur de MENSİ avec le concours des personnels du CEA : en 1,5 jours, environ 800 000 points 3D ont été enregistrés sur les 4 pièces, à savoir :

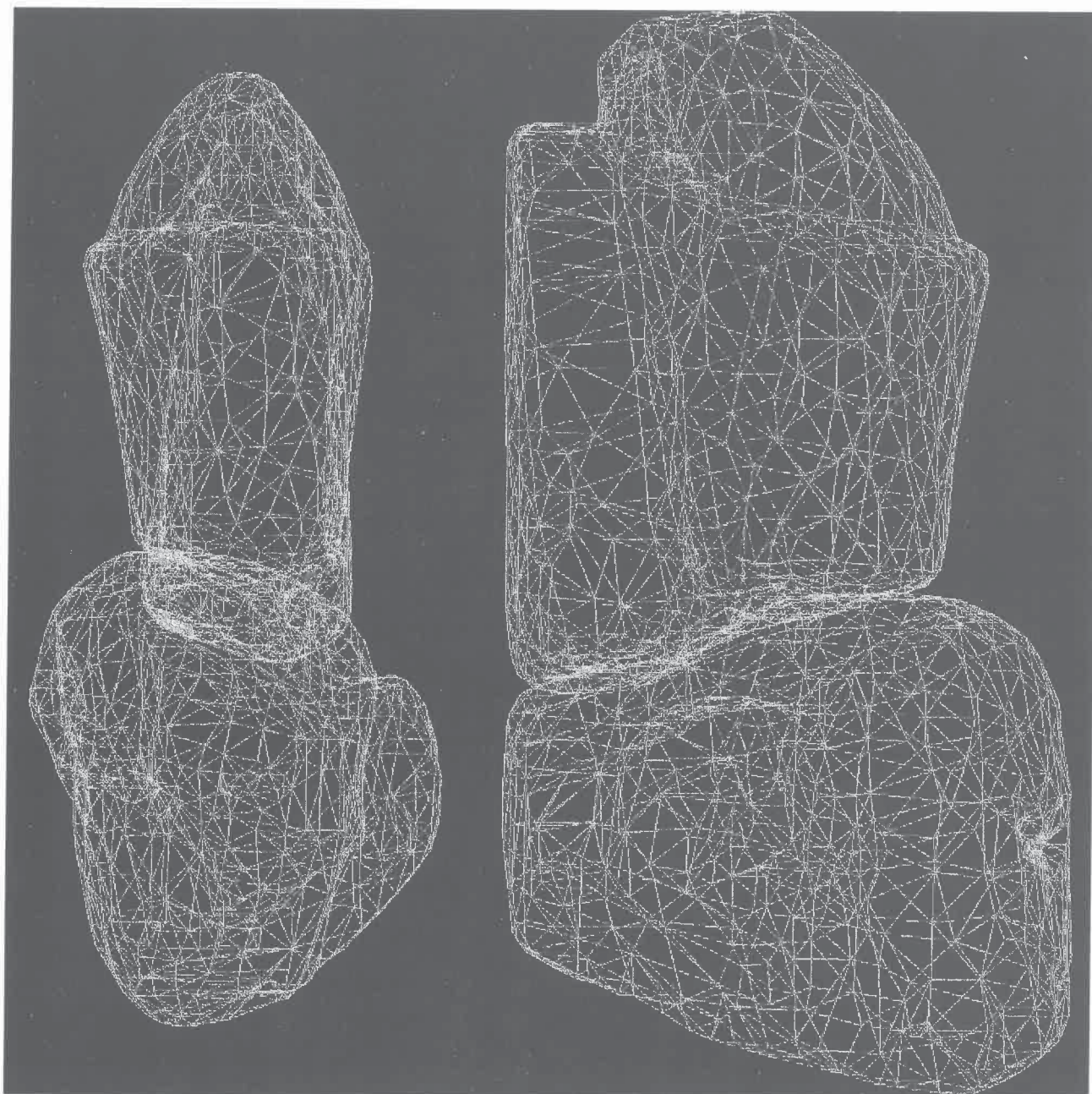
- 366 000 points sur le torse
- 215 000 points sur la couronne
- 162 000 points sur la tête
- 53 000 points sur le bras

La saisie complète d'une pièce est obtenue en combinant plusieurs relevés partiels obtenus à partir de positions différentes du capteur (le rayon laser ne traverse pas la matière !) : le choix des stations est important pour éviter de laisser des parties cachées : les surfaces des pièces étaient ici relativement simples, mais le problème a été compliqué par le fait que le CEA ne disposait pas sur place de moyens de manutention suffisants : de ce fait, le relevé est partiel dans la zone du menton pour la tête et de la moitié droite pour la couronne (ces deux blocs étaient posés sur le sol et n'ont pu être retournés) ; le torse et le bras ont été saisis sans lacune car le torse était placé sur des supports (autorisant le scanning par-dessous) et le bras a pu être déplacé ("seulement" 700 kg).

La résolution atteinte (dimension de la maille) est de l'ordre d'un point tous les centimètres, avec des surdensités sur les parties importantes et dans les zones correspondant aux fractures des blocs, pour obtenir une bonne définition des pièces intermédiaires à créer ; réalisées dans l'urgence, ces opérations de relevé n'ont malheureusement pas permis une coordination suffisante avec l'équipe Coignard, utilisatrice finale des résultats, qui aurait pu préciser davantage ses besoins et éviter certaines insuffisances.

MENSİ s'est ensuite chargé de la modélisation des quatre pièces, opération aujourd'hui bien rôdée par une déjà longue expérience : le logiciel 3Dipsos a permis de construire les surfaces par facettes triangulaires, le logiciel SURFACER permettant de combler au mieux les lacunes laissées par le scanning, car il est indispensable d'obtenir des surfaces "fermées" : le résultat final constitue une base de données triangulées comptant près de 1,3 million de facettes :

- 700 000 pour le torse
- 211 000 pour la couronne
- 323 000 pour la tête
- 51 000 pour le bras



Visualisation du maillage : le maillage volumique provient du maillage surfacique réduit fourni par l'étude géométrique (TIEM).
(Copyright EDF 1998)

4 – ACCOSTAGE VIRTUEL

Les techniciens d'EDF (Études et Recherches, service IMA) ont alors pris en charge, à partir d'un logiciel de réalité virtuelle, la mise au point de procédés de visualisation et de déplacements relatifs des blocs permettant de détecter les interpénétrations éventuelles, ce qui constitue un progrès par rapport à la méthode utilisée pour l'Auguste ; en effet, le logiciel 3Dipsos de MENSİ ne comporte pas encore de module "accostage" spécifique.

Le 18 décembre 1997, Jean-Yves Empereur, Jean Pierre Corteggiani et le restaurateur Roland Coignard ont pu alors guider l'accostage des blocs grâce aux images virtuelles : ils étaient installés face à un grand écran de 3 m de base sur lequel étaient projetées les "doubles" 3D des blocs et ils pouvaient demander au pilote de l'ordi-

nateur de déplacer et faire pivoter les 4 blocs les uns par rapport aux autres au millimètre près ; le dispositif était complété par la vision en relief de la scène grâce à des lunettes spéciales, fournissant une aide précieuse pour juger de l'alignement des blocs et apprécier l'effet obtenu.

Cette séance d'une heure permit de confirmer que torse, tête, couronne et bras appartiennent bien au même colosse (ce qui n'était jusque-là qu'une hypothèse en ce qui concerne la couronne) : la continuité du pilier arrière est apparue évidente et sans équivoque ; en une heure, les archéologues avaient pu faire renaître le Colosse d'Alexandrie en tirant partie de l'interactivité virtuelle : il aurait fallu des jours d'efforts énormes et risqués pour obtenir un résultat sans doute moins précis avec les blocs originaux.

Voici un commentaire à chaud de J. Y. Empereur à la sortie de cette séance d'anastylose virtuelle du 18 décembre :

« Pour une masse aussi colossale, c'est une technique d'une grande aide pour l'archéologue, car il est évident qu'on ne peut essayer de recoller ces pièces sans être sûr de notre tentative. Sur l'image virtuelle, on peut faire différents essais, voir si cela colle plus ou moins bien, voir les points de contact, et cela facilite l'anastylose, cette ré-érection du Colosse qui sera une opération unique puisqu'on n'a pas le droit à l'erreur »

Le modèle virtuel ainsi défini a par la suite été encore affiné "à tête reposée" par le restaurateur Benoît Coignard et les techniciens d'EDF, en particulier G. Thibault, expert EDF en "réalité virtuelle", ceci afin de contourner certaines des insuffisances actuelles du logiciel 3Dipsos en matière d'accostage : l'astuce a consisté à se placer "à l'intérieur" d'un bloc pour mieux percevoir la pénétration par un autre bloc : il restait alors à déplacer et pivoter une des pièces jusqu'à ramener la zone de pénétration à un point singulier.

5 – EXPLOITATION DU REMONTAGE VIRTUEL

Une fois le modèle numérique arrêté, il a pu servir de base de données pour répondre à des besoins très variés, sortant parfois du strict cadre de la restauration : les techniciens d'EDF ont pu en particulier :

- Fournir les volumes exacts des 4 blocs, à savoir :
 - 6,223 m \geq pour le torse
 - 0,877 m \geq pour la couronne
 - 0,955 m \geq pour la tête
 - 0,249 m \geq pour le bras
- Fournir les poids exacts à partir de la connaissance de la densité du granit.
- Calculer la position exacte des 4 centres de gravité et la valeur des moments d'inertie.

Des informations annexes ont pu également être obtenues, en particulier les dimensions englobantes des pièces permettant de définir au mieux le colisage pour le transport ; les images 3D du Colosse virtuel remonté ont permis d'illustrer nombre d'articles sur le sujet bien avant que le remontage réel soit effectué.

Il faut insister sur le fait que les calculs de statique ont été extrêmement simples sur les modèles virtuels alors qu'ils auraient été problématiques sur les blocs réels : ils ont largement contribué à la conception et au dimensionnement du réseau de fixation entre les blocs réalisés par des broches rentrant dans des fourreaux scellés ; en particulier, la mesure sur les blocs virtuels des angles de glissement moyens entre couronne et tête d'une part, tête et torse d'autre part ont permis un calcul simple de la tenue en cisaillement des broches.

L'accès facile aux centres de gravité additifs a largement orienté le positionnement des forages pour les liaisons couronne/tête, couronne + tête/torse, ainsi que pour la définition de la base support remplaçant les pieds du Colosse (que J. Y. Empereur recherche toujours) et de la structure métallique placée en renfort du pilier arrière.

Des calculs de résistance des matériaux par éléments finis tétraédriques ont également été réalisés par

EDF (département MMN) avec le logiciel Code-Aster : il a fallu pour cela compresser fortement la base de données, passant de 1,3 millions de triangles à 21 000 triangles, ce qui induit une réduction des volumes inférieure à 4 % : certaines insuffisances (ou mauvaise adaptation) des logiciels utilisés ont fortement alourdi le travail à réaliser, certaines opérations totalement manuelles prenant même facilement un caractère fastidieux ; ces travaux allaient également permettre la définition des "semelles" de forme complexe assurant le transfert de charge entre les blocs et vérifier leur capacité de résistance à la compression.

6 – REMONTAGE EFFECTIF DU COLOSSE

Le caractère prestigieux de l'opération de réhabilitation du Colosse avait déjà permis de mobiliser des appuis nombreux et puissants : pour le réassemblage proprement dit, les Coignard allaient pouvoir s'appuyer également sur le secteur des Travaux Publics, en l'occurrence le CEBTP, Centre Technique de ce secteur industriel : en effet, en repassant du virtuel au réel, la gravité reprenait ses droits et les problèmes de manutention toute leur acuité : nos restaurateurs allaient pouvoir ainsi disposer d'un hall équipé de deux ponts de 20 tonnes rendant les manœuvres beaucoup plus faciles qu'à Alexandrie, et il apparaissait alors qu'il eut été plus facile (et plus économique) de faire le relevé par SOISIC à ce stade, ce qui eut autorisé une couverture tout à fait complète des blocs évitant certaines approximations.

Le transport des blocs depuis Alexandrie avait été plusieurs fois retardé pour des raisons diverses dont l'une était l'espoir d'y intégrer le bloc des pieds du Colosse, le projet de remontage incluant initialement cette pièce essentielle que J. Y. Empereur pensait retrouver rapidement en dégageant des blocs de béton déjà immergés de la fameuse digue : devant l'échec (provisoire ?) de ces efforts, il a fallu se résoudre à construire un socle pour y poser le torse, ce qui modifiait sensiblement le projet des restaurateurs.

Le Colosse ayant été finalement acheminé début mars dans le hall du CEBTP (voir la couverture du présent numéro XYZ), il restait moins de 2 mois avant l'inauguration de l'exposition pour le 6 mai : l'équipe des Coignard et les métalliers de la société BOVIS allaient devoir faire des prodiges pour tenir ce délai impératif, ceci malgré des problèmes administratifs non réglés avec certains des partenaires du projet, difficultés qui n'ont rien d'étonnant dans ce type de collaboration.

Les restaurateurs avaient prévu des liaisons entre blocs assurées par deux broches parallèles scellées dans une pièce et rentrant dans deux manchons scellés dans l'autre pièce, afin de réaliser un ensemble démontable facilitant les transports ; les emplacements optimaux des broches et leur dimensionnement (diamètre de 50 mm) ayant été définis par l'étude EDF sur le modèle virtuel, il fut possible de monter les 4 pièces en position horizontale sur des rails permettant des mouvements relatifs parfaitement parallèles aux broches à implanter, et assurant du même coup le guidage de la perforatrice nécessaire au forage des logements : l'installation de ce dispositif allait constituer la première étape du travail.

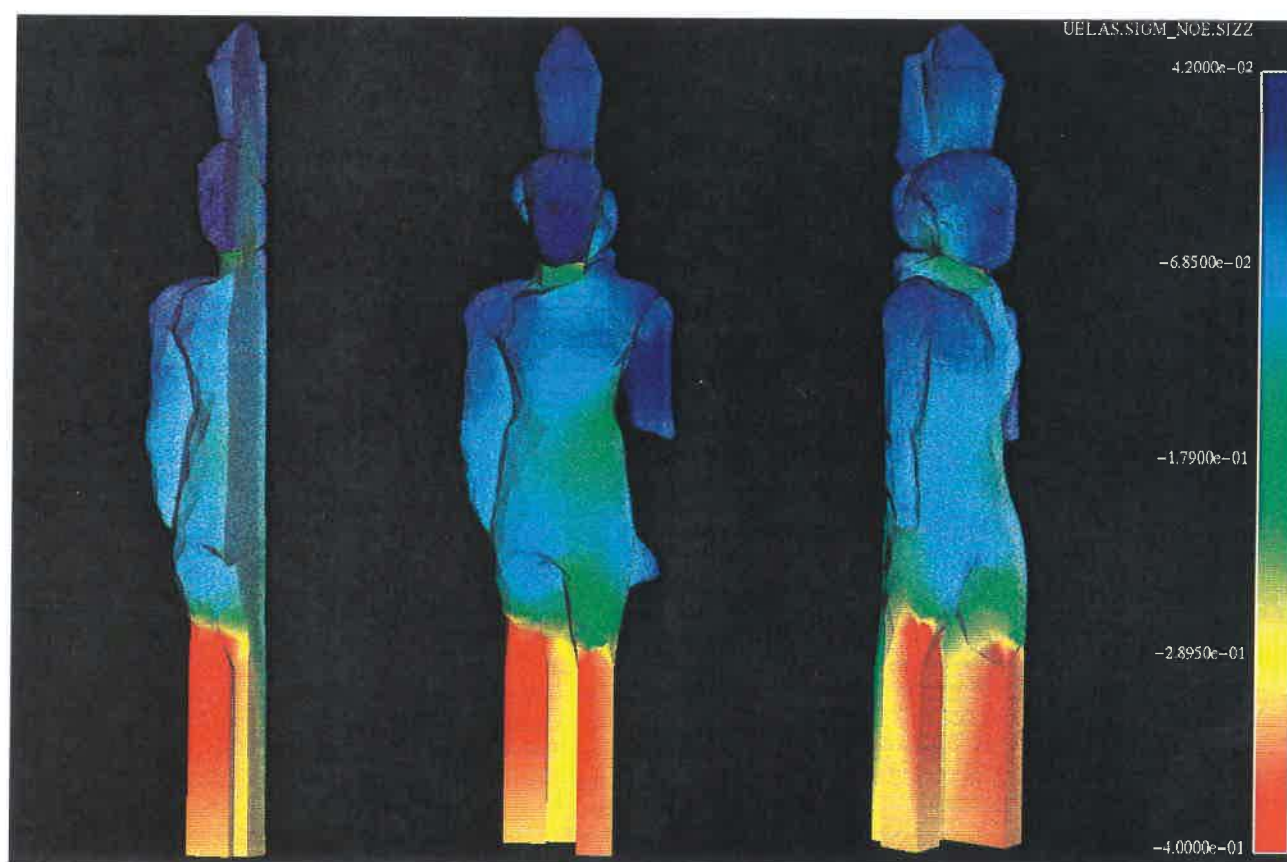
Simultanément, le CEBTP, poussant plus loin sa collaboration, prit en charge la caractérisation du matériau

des blocs : une auscultation dynamique (mesure de la vitesse de propagation d'une onde sonore) permet de "cartographier" les caractéristiques locales du granit, de déceler les éventuelles zones de fissures, ... étude complétée par des mesures de porosité, de capillarité et un contrôle du dessalement réalisé en Égypte.

Exploitant ensuite les résultats de la simulation statique réalisée par EDF, les techniciens du CEBTP allaient également pouvoir vérifier la tenue en compression des blocs eux-mêmes et faire l'étude du dimensionnement structural de l'ossature métallique complémentaire prévue, et aussi contrôler la capacité de l'ensemble à résister à certaines contraintes accidentelles : vent violent, défaut de verticalité de l'assiette, vibrations éventuelles du sol support...

Grâce au travail de préparation très poussé rendu possible par la mise en œuvre de techniques nouvelles dans ce domaine, les travaux d'assemblage proprement dits allaient se dérouler dans les meilleures conditions, sans hésitation ni erreur, et le Colosse pouvait être érigé comme prévu le 5 mai après-midi sur l'embase préparée par le CEBTP à l'entrée du Petit Palais d'où il présidera à l'exposition sur "La Gloire d'Alexandrie" jusqu'au 26 juillet.

Il est prévu que le Colosse soit ensuite transporté sous d'autres cieus avec une grande partie de l'Exposition avant de retourner définitivement à Alexandrie où il devrait constituer une des pièces maîtresses du futur Musée dont la création semble acquise.



Visualisation des efforts transitant dans le colosse :

On étudie la stabilité de la statue sous son propre poids, et on visualise les efforts transitant dans le colosse.

On visualise les résultats sur une demi statue afin d'observer les efforts dans la pierre.

Échelle : les valeurs des contraintes verticales sont données en MégaPascal. Les zones rouges correspondent aux zones où les efforts sont les plus importants. La pression exercée par la base de la statue est d'environ 0,5.

(Copyright EDF 1998)