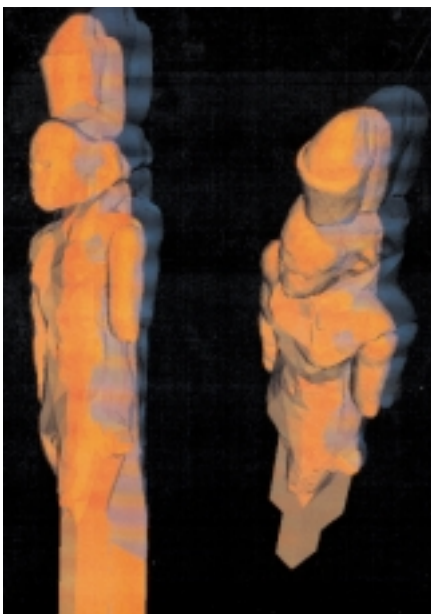


## PTOLEMEE : le Colosse d'Alexandrie ressuscité

L'époque ptolémaïque, du IV<sup>e</sup> au I<sup>er</sup> siècle avant Jésus-Christ, entre Alexandre le Grand et Cléopâtre, est une période de l'histoire égyptienne particulièrement brillante : le Phare, la bibliothèque, les écoles de philosophes, poètes, mathématiciens (Euclide, Erastothène, Apollonios) et de mécaniciens (Straton, Héron, Ctésibios) rayonnèrent en cette période pendant laquelle l'Égypte hellénistique a dominé culturellement le monde méditerranéen, Alexandrie succédant à Athènes et Rhodes.

L'art égyptien ptolémaïque jusqu'ici méconnu en France est cette année mis à l'honneur, grâce notamment aux fouilles françaises entreprises par l'équipe de Jean-Yves Empereur à Alexandrie. Lors de cette campagne archéologique, **une statue colossale de granite, fracturée en quatre blocs, figurant un Ptolémée, a été découverte alors qu'elle reposait par 8 mètres de fond dans le port d'Alexandrie.**

Le Mécénat Technologique et Scientifique d'EDF a employé les compétences en imagerie informatique et en mécanique des départements



**2** Déformée sous l'action du poids propre : le colosse penche en avant de 0,04 mm au plus



**1** Du maillage de surface obtenu par scannage 3D au calcul mécanique

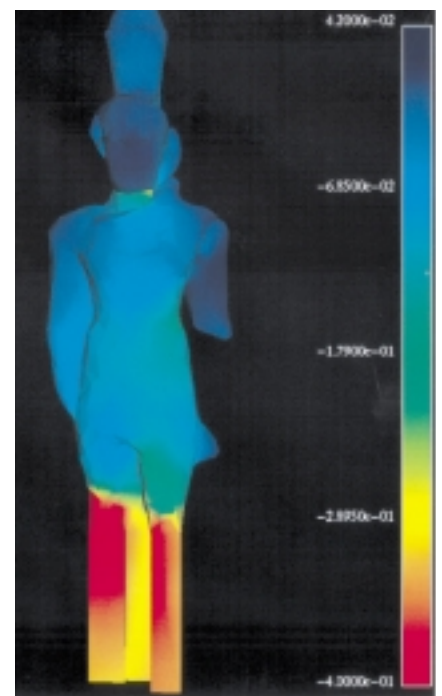
« Traitement de l'Information et Études Mathématiques » (TIEM) et « Mécanique et Modèles Numériques » (MMN) de la Direction des Études et Recherches afin d'aider à la re-érection du Colosse devant le Musée du Petit Palais à Paris.

### L'étude géométrique réalisée à TIEM

Un relevé laser a été mené à l'aide de la caméra tridimensionnelle SOISIC. Les quatre blocs (couronne, tête, torse, bras) ont été scannés avec une résolution moyenne d'un point par centimètre. À partir de cette enveloppe de points, la reconstruction des surfaces a été réalisée à l'aide du logiciel 3Dipsos. Le maillage de peau ainsi obtenu est constitué d'environ un million cinq cents mille triangles. Le remontage virtuel de la statue (anastylose) a été effectué grâce aux techniques de réalité virtuelle, sous la conduite des archéologues et des restaurateurs. Il a permis de définir avec précision les positions respectives des quatre blocs.

La dernière étape, afin de réaliser les calculs mécaniques, est de constituer un maillage réduit du volume, utilisable par le *Code\_Aster*. La compression et la

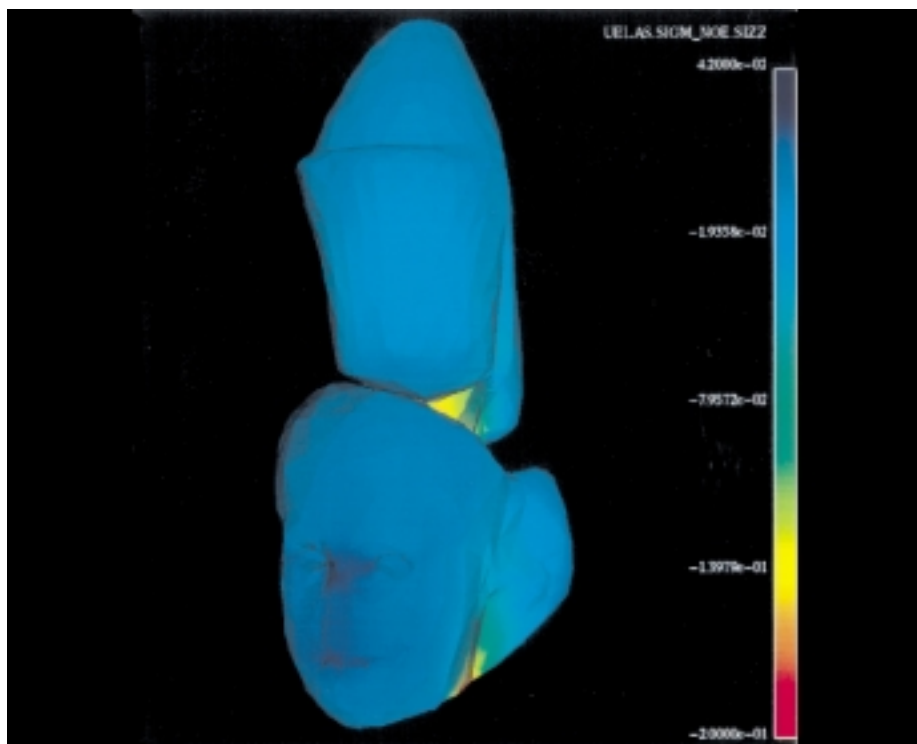
conversion des maillages vers le *Code\_Aster* ont été réalisées conjointement par TIEM et MMN. Le logiciel utilisé pour réduire le maillage de surface est Imedit (InnovMetric), le convertisseur vers le format I-DEAS™ pour le *Code\_Aster* a été développé à TIEM. Le maillage de peau résultant est composé d'environ vingt et un mille



**3** Contrainte verticale  $\sigma_{zz}$ . Valeur maximale de la pression exercée à la base : 0,5 MPa

# PTOLEMEE : le Colosse d'Alexandrie ressuscité (suite)

## 4 Contrainte verticale $\sigma_{zz}$ dans la tête



triangles (soit une réduction du nombre d'éléments de 70%).

### L'étude mécanique réalisée à MMN

La modélisation mécanique passe par l'obtention d'un maillage de volume. A partir des maillages de peau des quatre blocs en format I-DEAS™, MMN a engendré le maillage volumique à l'aide du logiciel SIMAIL (Simulog). Afin d'analyser la conformité du maillage obtenu (détection des "trous" dans le maillage de peau, détermination de la qualité des tétraèdres engendrés), on a utilisé le logiciel HOMARD développé à MMN.

Le maillage résultant de cette opération est composé d'environ quarante mille tétraèdres. Pour s'assurer que la réduction n'a pas modifié trop fortement la géométrie de la statue, un premier calcul *Aster* est effectué afin de déterminer les masses et les volumes de chaque bloc. Les résultats obtenus : 689 kg pour le bras, 2,650 tonnes pour la tête, 2,434 tonnes pour la couronne et 17,172 tonnes pour le torse, sont très satisfaisants puisque l'erreur par rapport au calcul 3Dipsos, due à la réduction, reste inférieure à 2%.

Le choix technologique adopté par le CEBTP afin de solidariser les blocs entre eux consiste à introduire un goujon dans

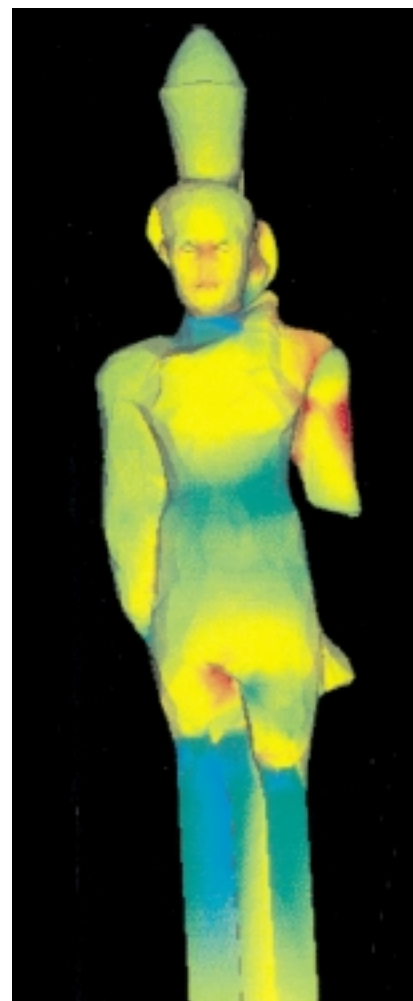
les massifs en vis-à-vis et de les assembler. De plus une semelle est réalisée pour effectuer la liaison entre les blocs et répartir les contraintes sur une plus grande surface. Une attention particulière a été portée à la modélisation de ces liaisons entre blocs dans le *Code\_Aster*. Une étude complémentaire montre que la modélisation prenant en compte les semelles de remplissage et les goujons, (modélisés par deux liaisons 3D\_POUTRE), représente correctement les niveaux de contraintes dans les goujons.

Une fois le colosse virtuel assemblé et goujonné, les calculs de stabilité statique sous son poids propre ont pu être menés. La visualisation des contraintes élastiques avec le logiciel Enight sur le volume, sur des plans de coupe et sur les surfaces des blocs en contact permet de localiser des zones de concentration de contraintes, notamment au niveau des semelles. Par ailleurs la visualisation d'un critère de rupture de la pierre (critère d'Hoek et Brown) permet de repérer les maxima de "consommation" des capacités de résistance de la pierre.

Les résultats montrent que cette consommation reste toujours inférieure à 3% du seuil de rupture. On constate les effets de confinement ou d'étreinte dans les zones singulières (cou...) qui en

abaisse la valeur, alors que dans des zones plus cisailées (nez, zones centrales des blocs) on en augmente au contraire la valeur. Cette observation n'est pas intuitive, et constitue une réponse originale du calcul numérique. Ces mêmes calculs ont été menés avec un chargement en pression supplémentaire afin de simuler l'action du vent. Cette étude indique que les directions les plus défavorables sont les vents arrières et les vents latéraux gauches. Enfin, une analyse modale de la structure a permis de déterminer les premiers modes propres ainsi que les premières fréquences propres associées.

Le savoir-faire acquis a permis d'améliorer la chaîne de logiciels CAO-Calculs et constitue une bonne base pour de futures études de composants des réacteurs nucléaires : d'ores et déjà, cette démarche est appliquée sur des corps de robinets par le Service « Réacteurs Nucléaires et Échangeurs ».



5 Critère de résistance de Hoek et Brown