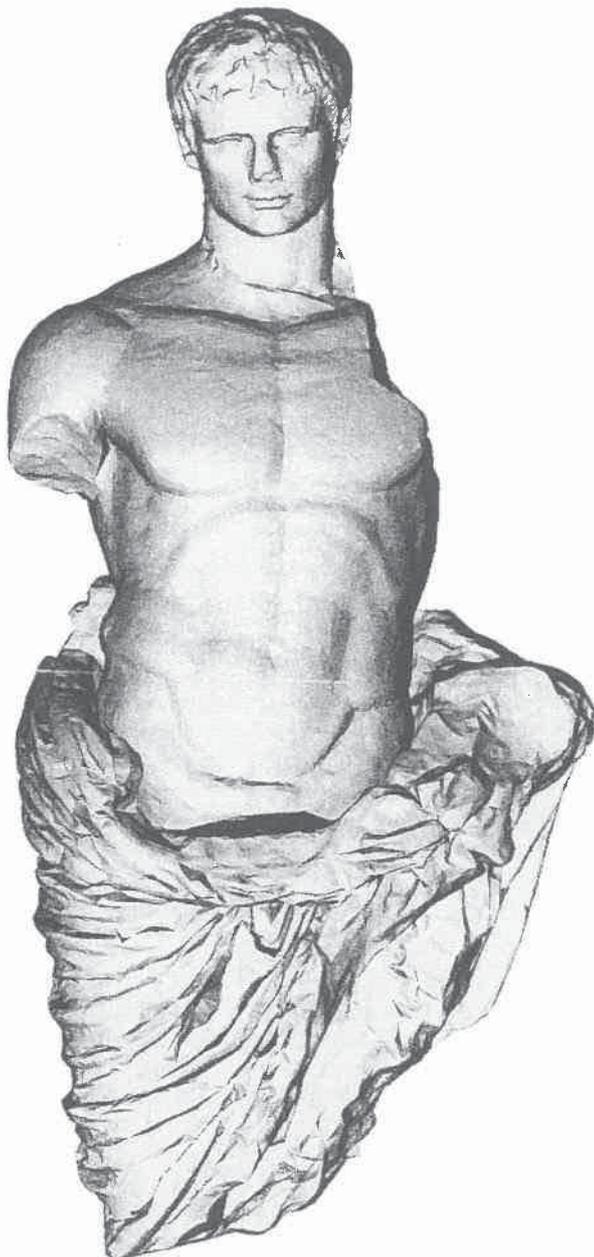
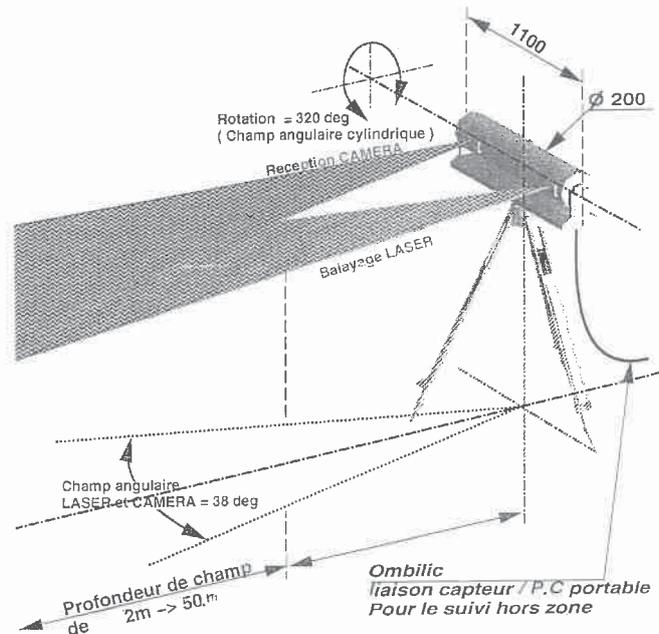


SOISIC- 3DIPSOS

un ensemble capteur- logiciel

Michel
Paramythioti
Société MENSIS



Musée d'Ariès - statue monumentale d'Auguste

Résumé

L'ensemble capteur-logiciel SOISIC-3DIPSOS est un "système de vision tridimensionnelle métrologique"; il permet la saisie sans contact et la modélisation tridimensionnelle précise d'objets ou d'installations.

Le capteur SOISIC effectue un balayage laser ligne par ligne de la scène à relever et enregistre par triangulation les coordonnées de chaque position discrète du spot (point relevé sur la surface). La priorité a été donnée à la précision (moulage optique) au détriment de la vitesse de saisie. Une très grande profondeur de champ (2m - 50m) et un champ angulaire important permettent l'acquisition de scènes très complexes et variées. Le capteur SOISIC est un équipement mobile facile à mettre en œuvre sur site et permet plusieurs points de vue de la même scène (qui seront fusionnés lors du traitement).

Le logiciel 3DIPSOS permet l'utilisation des grands nombres de points relevés (1.000.000 et plus) : il réalise les fonctions suivantes :

- Consolidation de plusieurs points de vue dans un référentiel unique.
- Segmentation du "nuage" de points global.
- Calcul des primitives correspondant à chaque forme élémentaire sélectionnée.
- Reconstruction de la scène relevée dans un format compatible CAO.

Le traitement est interactif et s'effectue sur station de travail SILICON GRAPHICS.

I. PRESENTATION

Le monde industriel éprouve le besoin de plus en plus général d'une information géométrique 3D complète et précise sur ses produits et installations tels qu'ils sont effectivement réalisés (modélisation 3D "TQC" Tel Que Construit), à bien distinguer de leur définition théorique (modèle CAO de conception) : pour les premiers, les systèmes de métrologie par contact (palpeurs) se sont beaucoup améliorés pour aboutir aux machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) bien connues ; pour les secondes (et les produits de grandes dimensions), on assiste depuis 1970 au développement des procédés de photogrammétrie industrielle complétés par des logiciels 3D performants et aujourd'hui relayés par la vidéo-



grammétrie qui permet une numérisation plus facile.

Le système "SOISIC" a été conçu, et développé avec des concours financiers d'EDF et de l'ANVAR, pour repousser les limites actuelles de la photogrammétrie dans certains domaines d'applications tout en réduisant dans de fortes proportions les coûts de traitement, la phase de restitution étant éliminée : on peut le présenter comme un "système de vision tridimensionnelle métrologique", ou encore de "moulage optique" qui se décompose en deux parties :

- Un dispositif mobile de saisie optique par balayage laser et triangulation (scanner laser tridimensionnel) comportant toutes les fonctions électroniques et informatiques temps réel, couplé avec un PC 486 portable permettant le pilotage du capteur, le calcul de triangulation en temps réel, le stockage des fichiers points et des traitements simples accessibles sur site.

- Un ensemble de logiciels spécifiques (3DIPSOS) permettant de traiter les gros fichiers de points tridimensionnels obtenus (1.000.000 et plus) sur station de travail pour constituer une base de données géométriques détaillée et précise et remonter en fonction des besoins à la modélisation mathématique TQC partielle ou totale et à tous les modes d'exploitation utiles de celle-ci.

II. SYSTEME DE SAISIE

Le système de saisie "SOISIC" assure le relevé de la scène étudiée en effectuant un balayage plan par faisceau laser de faible puissance défléchi par un miroir scanner (positions discrètes successives), le spot laser étant observé par une caméra linéaire (objectif photo + barette CCD) solidaire de la même plate-forme :

- L'angle d'émission (scanner) est mesuré en focalisant sur une barette CCD un rayon prélevé sur le faisceau principal et réfléchi également sur le miroir scanner.

- L'angle de réception est mesuré par la position de l'image du spot (fournie par la caméra linéaire) sur une autre CCD.

Il s'agit donc d'un dispositif de triangulation plane point par point entre la source laser et une seule caméra, le balayage ligne par ligne étant obtenu par rotation de la plate-forme en fin de ligne autour de l'axe miroir-caméra (balayage cylindrique par moteur pas-à-pas) et l'angle de site étant fourni par un codeur optique : la position d'un point dans l'espace est ainsi définie par trois angles que le PC portable de pilotage transforme en temps réel en coordonnées cartésiennes calculées dans le référentiel du capteur.

Ce dispositif, simple dans son principe, soulève des problèmes difficiles pour atteindre les précisions recherchées tout en couvrant un champ très important (nécessaire pour les modélisations d'environnements) ; il est aujourd'hui couvert par trois brevets dont deux internationaux.

L'ensemble a été analysé en détail au niveau des différentes fonctions (simulation généralisée sur ordina-



teur) afin d'optimiser la géométrie et d'obtenir un ensemble compact et facile à mettre en œuvre sur site en ambiance industrielle (l'application principale concernant les installations nucléaires) ; cette grande rigueur de mise en œuvre de la triangulation a permis d'utiliser une source laser de très faible puissance, afin d'obtenir un appareil léger et maniable et d'assurer des contraintes d'emploi et de sécurité minimales ; on notera les caractéristiques originales suivantes :

- Puissance laser très faible pour les distances accessibles.
- Balayage parfaitement plan (malgré les défauts des composants).
- Très grande profondeur de champ.
- Mesure approchée de la distance avant saisie de chaque point, focalisation automatique du faisceau (autofocus laser).
- Mesure de la luminosité retour avant saisie de chaque point, réglage correspondant de la durée du tir laser.

Deux prototypes industriels ont été mis en service en 1992 ; le capteur se présente comme un cylindre (diamètre 20 cm, longueur 95 cm) contenant les blocs émission et réception et l'ensemble électronique temps réel ; ses caractéristiques (matériel de série) sont les suivantes :

- | | |
|--|--------------------------------|
| • Longueur de base | 775 mm |
| • Diamètre plate-forme tournante | 200 mm |
| • Longueur hors tout (bâti) | 996 mm |
| • Poids (environ) | 20 kg |
| • Longueur d'onde laser | 675 nm |
| • Puissance diode laser | 2 à 20 mw
(choix opérateur) |
| • Puissance laser effectivement émise | 1 à 8 mw |
| • Puissance électrique consommée (environ) | 100 w |
| • Champ angulaire laser et caméra | 38° |
| • Champ angulaire cylindrique | 320° |
| • Profondeur de champ | 2m → 50m |
| • Cadence de saisie (environ) | 100 pts/sec |

On notera que la cadence de saisie de points tridimensionnels numérisés est sans commune mesure avec le travail de restitution en photogrammétrie, et que la dynamique de saisie permet de relever une grande variété de surfaces, obscures ou brillantes (du caoutchouc noir à l'inox poli).

Pour une utilisation optimum du champ cylindrique disponible, le capteur sera disposé horizontalement (saisie de scènes plus hautes que larges) ou verticalement (saisie de scènes larges ou d'environnements horizontaux pris de l'intérieur).

L'appareil est équipé d'une caméra vidéo couleur annexe donnant le point de vue de la caméra SOISIC et permettant à l'opérateur d'effectuer les opérations de cadrage sans être en vue directe de la scène (ombilical de 30 m et au delà si besoin) ; les images fournies par cette caméra peuvent être "plaquées" sur les surfaces

3D relevées afin de compléter l'habillage de la scène.

Une première série de capteurs est en fabrication et sera disponible courant 1995.

III. PRECISION

Comme pour tout système métrologique, les caractéristiques de dispersion sur le point élémentaire relevé et de distorsion du champ constituent les éléments essentiels de la performance: une étude théorique complète a été réalisée, permettant en particulier de relier les erreurs sur la mesure des coordonnées spatiales du point aux erreurs sur les angles relevés, donc aux caractéristiques de l'image du spot et aux performances des capteurs angulaires utilisés, ce qui a conduit à sélectionner et adapter ceux-ci pour ramener les écarts-types angulaires à quelques secondes d'arc (environ 10 μ rad.).

Nous rappellerons ici les formules simples donnant les écart-types partiels du procédé de triangulation sur les coordonnées du point élémentaire (dans l'axe du champ) en fonction des trois écart-types angulaires du dispositif de saisie :

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \gamma/2 \sqrt{\sigma^2 \alpha + \sigma^2 \beta} & \gamma &= \text{distance de saisie} \\ \sigma_y &= \gamma^2/2b \sqrt{\sigma^2 \alpha + \sigma^2 \beta} & \alpha, \beta &= \text{angles laser et caméra} \\ \sigma_z &= \gamma \sigma_\theta & \theta &= \text{angle codeur optique} \end{aligned}$$

On voit que, dès que la distance de saisie devient nettement plus grande que la base de triangulation (cas le plus fréquent), le terme σ_y devient tout à fait dominant.

Cette priorité accordée à la réduction de la dispersion a nécessité l'utilisation de barettes CCD très longues (5000 pixels, 35mm) complétées par une interpolation sub-pixel sur une image légèrement défocalisée (au moins 3 pixels pour permettre l'interpolation) ; la position de l'image sur la barette est ainsi connue à moins de 0,5 μ près.

Les précisions angulaires nécessaires (voir ci-dessus) étant inaccessibles par construction, la précision intrinsèque du système est obtenue par un étalonnage initial en usine sur banc métrologique (mise en mémoire de deux tables d'équivalence lecture barette-angle) qui prend en compte toutes les distorsions géométriques ou optiques, la principale qualité requise étant de ce fait la fiabilité (problème de correction des dérives thermiques en particulier).

Dans ces conditions, l'écart-type sur la position du point élémentaire saisi se situe à environ 0,6 mm à 5 m, cette valeur étant en théorie proportionnelle au carré de la distance du fait que la longueur de base est fixe, d'où les ordres de grandeur suivants : 0,6 mm à 5 m, 2,5 mm à 10 m, 10 mm à 20 m, 40 mm à 40 m.

Les études en cours laissent à penser que ces valeurs déjà excellentes sont loin de constituer une limite : l'analyse de certains effets parasites et leur meilleure maîtrise peuvent laisser espérer dans un avenir proche une dispersion de l'ordre de 0,2 mm à 5 m et une distorsion du champ du même ordre ; dans cette hypothèse, la précision du dispositif sera limitée

d'abord par celle de l'étalonnage qui sera à revoir avec des exigences plus sévères.

On voit que la précision obtenue au niveau du point élémentaire est actuellement du même ordre que celle de la photogrammétrie industrielle ; on peut ajouter que la grande densité de points accessibles induit une précision très supérieure au niveau de l'élément de surface modélisé (la précision s'améliore comme la racine carrée de la redondance ; une sphère définie par 400 points sera connue de manière 10 fois plus précise que la même sphère définie par 4 points).

IV. TRAITEMENT

Chaque saisie élémentaire (depuis un point de vue donné) peut fournir un nombre considérable de points tridimensionnels numérisés (de 50.000 à 500.000) : le traitement informatique peut prendre en compte les fichiers issus de différents points de vue de la même scène (de 2 à 5 en général) reliés par la saisie commune d'au moins trois sphères de consolidation (outillage annexe éventuel) ou d'objets géométriques (plans, cylindres,...) appartenant à la scène ; il s'effectue en temps différé sur station de travail (SILICON GRAPHICS) et comporte deux phases :

- Calcul des positions de chaque sphère (ou des objets retenus) dans chacun des référentiels primaires, puis fusion des fichiers primaires dans un référentiel unique par superposition des objets communs ; ce référentiel pourra être celui de l'installation si les repères correspondants existent.
- Segmentation de la scène en groupes de points élémentaires et traitement par calcul des formes correspondantes, simples (plans, sphères, cylindres) ou complexes (surfaces gauches), pour remonter aux formes paramétrées, donc au fichier "as built" utilisable par un système de CAO.

On a déjà vu que le nombre considérable de points traités induit de fortes redondances dans le calcul, d'où une précision sur les paramètres CAO obtenus largement améliorée par rapport à celle du point élémentaire saisi (c'est en particulier le cas pour les centres des sphères de consolidation).

L'ensemble des logiciels spécifiques correspondants à ces fonctions, baptisé 3DIPSOS, permet la consolidation et la visualisation de scènes importantes (1.000.000 de points et plus) ainsi que les opérations suivantes :

- Segmentation de la scène en nuages de points élémentaires.
- Définition de coupes sur des surfaces et lissage mathématique de ces coupes.
- Lissage mathématique de nuages de points sur des surfaces.
- Modélisation paramétrique de primitives simples : plan, sphère, cylindre, cône.
- Modélisation de tuyauteries (piping) avec définition des isométriques.
- Représentation par réseau de facettes des surfaces gauches.

- Superposition des images vidéo couleur et des surfaces 3D.

Une définition plus élaborée des surfaces gauches relevées (par ex. carreaux de BEZIER) sera abordée prochainement ainsi que d'autres applicatifs spécifiques à différents "métiers" (automatisation partielle et création de macro-instructions permettant d'accroître la productivité).

V. APPLICATIONS

L'objectif initial du projet visait la modélisation de parties d'installations nucléaires, en particulier tuyauteries complexes, pour permettre par la suite des simulations d'interventions de maintenance ; le champ des applications envisageables apparaît en fait beaucoup plus large (en particulier du fait des distances accessibles) : nous évoquerons ici quelques applications récentes.

A) DOMAINE NUCLEAIRE

Plusieurs opérations de saisie et modélisation d'environnements nucléaires ont été réalisées sous l'égide d'EDF pour évaluer les possibilités du capteur et du logiciel sur différents types d'application: nous citerons plus particulièrement :

- CHOOZ B : relevés de deux environnements (tuyauteries complexes), respectivement 7x6x6m (avec sphères de consolidation) et 15x10x8m (sans aucun outillage annexe) ; le plus petit a été complètement modélisé (voir en fin d'article).
- BUGEY : un environnement complexe (en zone contrôlée) sur deux niveaux (30x10x15m, 2.000.000 pts) a été relevé et modélisé pour simuler l'opération projetée d'échange de deux gros échangeurs (manutention, démontages nécessaires, etc...).

- CRUAS : un environnement complexe et difficile d'accès (également en zone contrôlée) a été relevé (500.000 pts) et modélisé ; le modèle obtenu a servi de support à des tests de "réalité virtuelle" dans le cadre des recherches EDF, avec l'avantage qu'il s'agit ici d'un environnement "réel" et non imaginaire (on notera la différence entre saisie du réel et images de synthèse).

B) ECLAIRAGE PUBLIC

Plusieurs relevés ont été réalisés afin d'utiliser les modèles 3D obtenus dans des simulations d'éclairage public (réalisées avec des logiciels spécifiques) :

- PONT NEUF : relevé et modélisation de l'ensemble petite branche du Pont Neuf et Pointe du Vert Galant (150x80 m, 2.500.000 pts) pour choix entre les projets d'éclairage soumis à la Mairie de Paris.
- LOUVRE : relevé et modélisation d'un élément de façade de la Cour Napoléon pour tester les simulations sur colonnes et bas-reliefs.
- PLAISIR : relevé et modélisation de la Mairie de la ville de Plaisir.

C) GROTTES PRÉHISTORIQUES

Les possibilités de modélisation de grottes de grandes dimensions semblent très intéressantes, soit pour réaliser un modèle informatique de la grotte (visite virtuelle), soit pour préparer la réalisation d'une véritable copie destinée au public (type LASCAUX II) :

- LASCAUX : essais préliminaires visant à vérifier l'innocuité du laser utilisé sur les surfaces fragiles (lichens, peintures).

- COSQUER : relevé complet de la grotte (nov-déc 94) avec mise en œuvre du capteur par un plongeur et pilotage depuis l'extérieur (ombilical de 300m + liaison audio) : saisie de 5.000.000 de points, modélisation en cours pour visite virtuelle (voir émission Thalassa) et préparation possible de COSQUER II.

D) ARCHÉOLOGIE

Les possibilités de modélisation fine de statues et éléments architecturaux complexes ouvrent des possibilités nouvelles dans les domaines de la reconstruction (simulation de positionnement relatif ou d'accostage de différentes parties) et de la sauvegarde du patrimoine ; une expérience concluante a été réalisée :

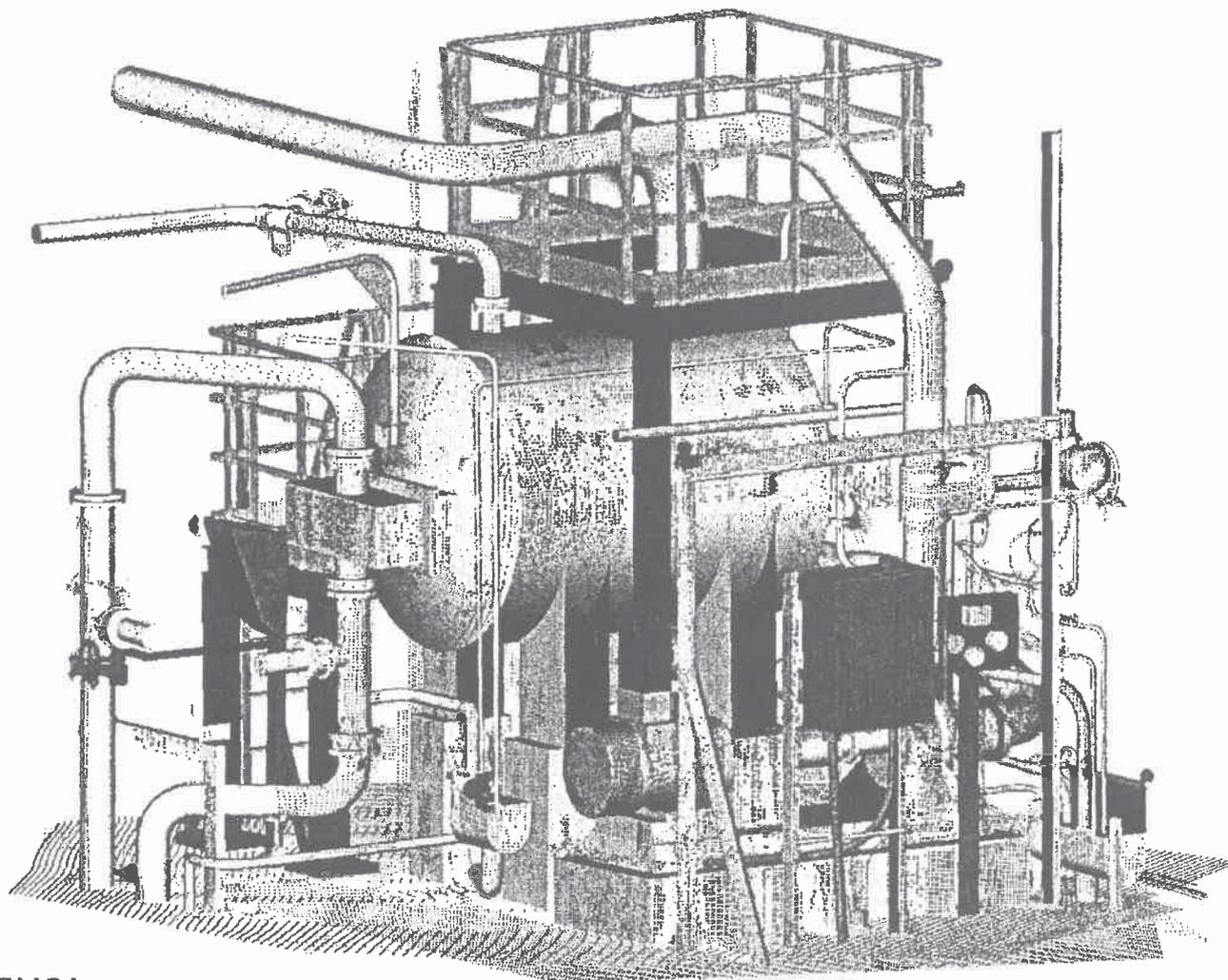
- AUGUSTE: la statue monumentale d'Auguste (en deux parties principales) qui est aujourd'hui exposée au Musée d'Arles a été relevée (1.200.000 pts) et modélisée, et les différents éléments positionnés virtuellement pour définir le socle. (illustration en début d'article).

VI. CONCLUSION

Une mise en œuvre très rigoureuse de la triangulation laser, couplée à un logiciel évolué bien adapté au traitement de gros "nuages" de points, a permis de réaliser un système de modélisation 3D complet et facile à mettre en œuvre, dont les applications potentielles s'avèrent multiples et dépassent largement le cadre EDF initialement envisagé.

Comme pour toute technique nouvelle encore en devenir, on peut s'attendre à des progrès rapides dans les années à venir, concernant ici la précision, la vitesse de saisie et la plage de distances accessibles, ceci permettant d'élargir le champ d'application des techniques 3D qui semblent promises à un bel avenir.

(Société MENS I - Z.A. de la Fontaine du Vaisseau - 4 rue Edmond Michelet - 93360 Neuilly Plaisance - Tél. : 43 09 84 84)



MENS I