

Photogrammétrie et archéologie sous-marine profonde

Le cas de l'épave étrusque Grand Ribaud F

■ Pierre DRAP - Luc LONG

Après avoir examiné les problèmes et les besoins des archéologues sous-marins qui ont entrepris l'étude de l'épave étrusque Grand Ribaud F, en 2000, 2001 et 2002, située au large de Giens (Var, France) par 61 m de fond, nous allons vérifier, dans cette deuxième partie, comment la photogrammétrie peut générer des représentations 3D suffisamment précises pour servir désormais de base à l'étude rigoureuse du site.

PHOTOGRAMMÉTRIE

Adaptation au milieu sous-marin

■ Prises de vues

Si l'utilisation d'engins automatisés est relativement rare en archéologie sous-marine, le mécénat prodigué sur l'épave étrusque par la Comex, inventeur du site, n'était possible que sur une période relativement courte. Ainsi, après le départ du Minibex, les archéologues ont troqué les écrans de contrôle d'un poste de commandement confortable, contre la vision

embuée du masque de plongée et les aléas de "l'ivresse des profondeurs". De fait, les immersions à partir de L'Archéonaute, à 61 m, le fond au niveau du bois, se limitaient à moins de 15 minutes par jour et par personne. En outre, comprimée sous le sable et le chargement, une vase volatile obscurcissait la vision au moindre mouvement. Du coup, un simple ramassage d'objets laissait les plongeurs dans le noir absolu et un battement de palme pouvait être fatal aux prises de vues. De même, dévaser le site revenait à travailler en aveugle sans pouvoir attendre l'éclaircie.

Dans de telles conditions, sises à l'extrême limite de la plongée professionnelle à l'air, établir un plan topographique précis du site selon les méthodes conventionnelles s'avérait d'emblée comme une tâche très difficile, voire impossible à réaliser.

Nous avons donc opté pour une méthode photogrammétrique numérique légère en utilisant, pour la campagne d'août 2000, un appareil photographique numérique non métrique, Nikon D1, embarqué dans un caisson étanche fixé sur la barre technique du sous-marin *Rémora 2000* (Comex). Les éclairages halogènes étaient également fixés sur la barre technique. Lors de la campagne d'octobre 2001 les prises de

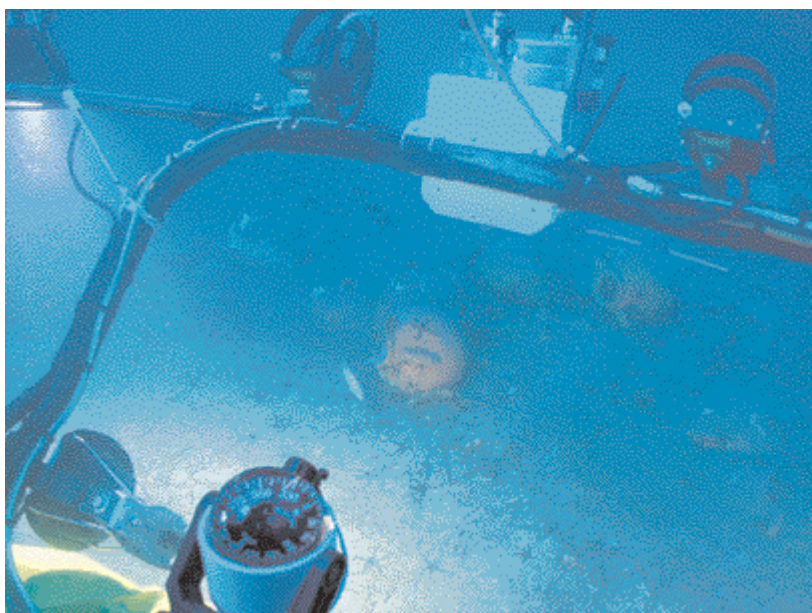
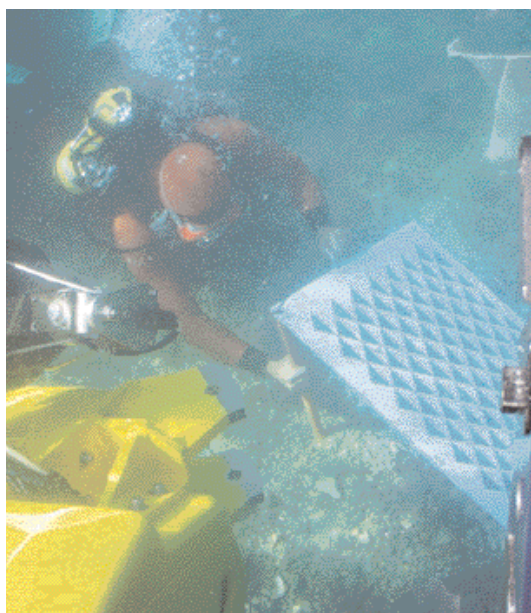


Figure 1. Vue de l'intérieur du sous-marin. Vue de gauche, un plongeur positionne la mire de calibration, vue de droite, l'appareil de prise de vue est situé à l'extérieur, sur la barre technique, dans le caisson étanche blanc. L'axe optique est vertical.

■ ■ ■ vues furent effectuées par un plongeur à l'aide d'un Nikon Coolpix, protégé dans un caisson Ikelite équipé de deux flashes.

■ Calibration

La calibration des cameras dans un contexte multimédia, c'est-à-dire quand les rayons lumineux traversent plusieurs milieux caractérisés par des indices de réfraction différents, est un problème clairement identifié depuis plus de 50 ans ([ASP, 1980] page 838). Nous renvoyons le lecteur aux travaux de Hans-Gerd Mass pour un bon aperçu de l'état de la question en ce domaine [Maas, 2000]. Le problème n'est pas trivial, le faisceau lumineux passant au travers des différents dioptries (eau - verre - air) subit une réfraction en fonction de l'angle d'incidence.

Quelques solutions, plus ou moins complexes ont été mises au point, généralement interactives pour les plus rigoureuses, [Kwon, Lindley, 2000.] [Maas, 2000]. Même si Hans-Gerd Mass propose une solution simplifiée c'est toujours dans le cas le plus "simple" de la photogrammètrie multi-média : seulement trois média, l'objet à mesurer dans le

liquide et une lame à face parallèle entre l'objet et le capteur situé lui dans l'air. Y.-H. Kwon donne, dans le cas particulier d'un ensemble de points de contrôle, une représentation de cette distorsion "pin-cushion distortion", visible sur la figure ci-à gauche [Kwon, 1998].

Dans le cadre de ce projet, un des facteurs incontournables est de donner aux archéologues un outil de photogrammètrie qu'ils

pourront utiliser eux-mêmes avec une intervention réduite des photogramètres. L'idée est d'utiliser un logiciel du commerce, grand public et sérieux, d'un coût modeste.

Notre choix s'est porté sur Photomodeler, principalement à cause de son module de calibration particulièrement convivial. Les "distorsions" induites par l'aspect multimédia seront assimilées à des distorsions radiales, bien modélisées par le logiciel. Nous considérons l'ensemble caisson + appareil comme indéformable et la calibration est conduite comme si nous étions dans l'air. On peut voir sur la figure 1 la grille de calibration de Photomodeler V4, mise en place par un plongeur, sous l'appareil de prise de vue, solidaire du sous-marin.

■ Orientations

Comme nous l'avons déjà signalé, la prise de vue, en 2000, a été faite par un survol à basse altitude depuis le sous-marin *Rémora 2000* (Comex), puis plus simplement à l'aide d'un plongeur en 2001 et 2002. Les conditions difficiles de prise de vue et d'équipement du site nous ont conduits à minimiser les contraintes. Un ensemble de règles graduées, à partir de cylindres de PVC, maintenues entre elles par un câble fut déposé selon l'axe longitudinal de l'épave. Quelques flotteurs furent disposés de manière irrégulière pour indiquer la verticale. Les cibles supportées par ces flotteurs ont été mesurées et la verticale a pu être ainsi obtenue par moyenne. Les contraintes photographiques imposées au plongeur chargé des prises de vues restaient minimales : bandes plus ou moins parallèles, "bon" recouvrement. On ne pouvait guère être exigeant avec un opérateur, non photogrammètre, intervenant durant 10 minutes à 60 ou 61 m de fond, quelquefois sous l'emprise de la narcose à l'azote. La surabondance des photos constituait alors une relative sécurité lors de cette phase photographique.

Le site étudié s'étend approximativement sur une zone de 20 x 10 m qui a été couverte grâce à une soixantaine de photos lors de la campagne 2000 (sous-marin *Rémora 2000*, Nikon D1 et optique de 14 mm). En revanche, avec un plon-

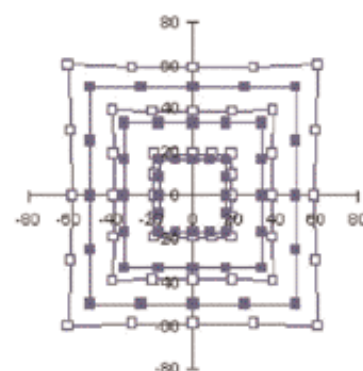


Figure 2. Coordonnées des points réfractés et non réfractés répartis sur trois cadres. [Kwon, 1998].

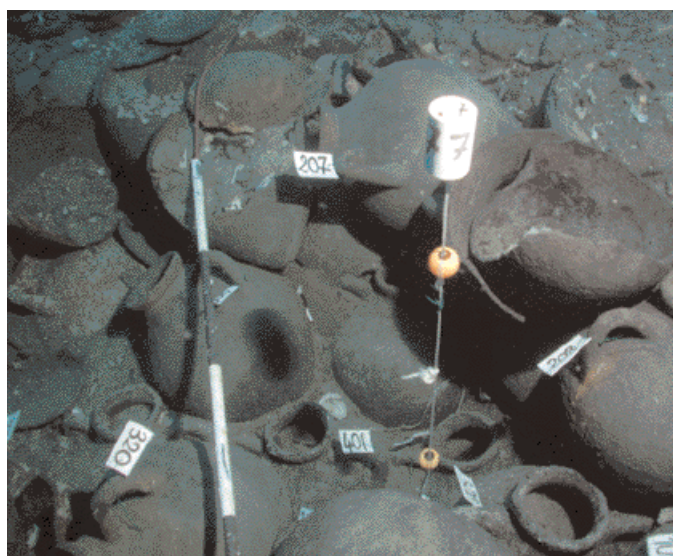


Figure 3. Prise de vues du site, 2001, on voit les flotteurs destinés à fournir une indication sur la verticale et les règles de mise à l'échelle.

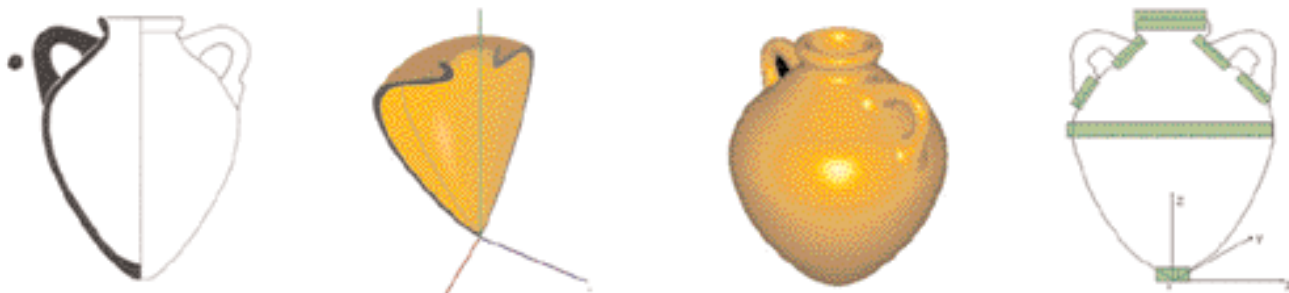


Figure 4. De gauche à droite : le modèle graphique élaboré par les archéologues, puis représentation numérique de ce modèle, enfin cinq zones d'une amphore sur lesquelles le relevé est effectué pour obtenir des faits de mesure.

geur équipé d'un simple *Coolpix*, le même nombre de photos fut nécessaire en 2001 pour couvrir seulement le sondage.

La fouille archéologique demeurant par nature une opération destructrice, à l'issue de la numérotation et les prises de vue, d'autres équipes de plongeurs se livrèrent au dévasage puis au démontage et à la récupération des amphores de la cargaison. Au préalable, un ensemble de corps morts, constitué de blocs de béton ou de métal, avait été déposé autour du site pour rattacher les différents types de relevés à un même système de référence. Les résidus d'adaptation sont à l'intérieur du centimètre.

Le relevé des amphores

■ Les différentes sources

Dans ce contexte, la mesure et la gestion des amphores de l'épave sont basées sur trois sources de données fortement incomplètes. La première représente le modèle théorique de l'amphore. Elle contient les normes géométriques nécessaires à la représentation graphique des récipients, les valeurs par défaut décrivant des dimensions caractéristiques de ces objets. Ces données évoluent lors de l'ajout d'un nouvel individu dans la base. La deuxième source est alimentée par le relevé photogrammétrique des objets basé sur les photographies prises lors des fouilles. L'information de la troisième source provient des mesures effectuées en laboratoire sur ces mêmes amphores, une fois qu'elles ont été récupérées. Dans ce travail, nous ne mentionnerons pas cette troisième source d'information. [Drap, Seinturier, Long. 2003]

La première source : le modèle théorique

Cette source s'implique dans l'expression graphique liée à la connaissance experte des archéologues (S1). Elle découle d'un modèle généré par l'observation des amphores. Les classes réunissent des informations de diverses natures sur les objets étudiés : la description géométrique de leur morphologie sous la forme d'un ensemble d'attributs géométriques, la description des faits possibles (observations et mesures possibles sur les objets) et la description des règles de calcul nécessaires pour évaluer les attributs géométriques en recourant aux observations effectuées.

La diversité des objets manipulés par l'archéologue et la complexité géométrique de leurs surfaces nous ont conduits à rechercher leurs caractéristiques morphologiques stables afin

d'y effectuer les mesures nécessaires à l'étude. Ces caractéristiques géométriques sont également décrites dans le modèle. Une série de primitives géométriques simples est utilisée pour approximer ces caractéristiques morphologiques. Elle est employée comme interface entre la mesure photogrammétrique et le modèle théorique. La description géométrique de la classe comporte une liste des attributs, la définition de la position et de l'orientation (translation, matrice de rotation) et la définition des caractéristiques géométriques : taille, diamètre du col, diamètre de la panse, etc. Pour chaque attribut représentant les caractéristiques géométriques de l'objet la valeur de l'attribut de classe est la valeur moyenne des attributs de l'individu déjà observés de cette classe.

La description des faits indique l'existence ou l'absence d'information observée, par exemple l'existence de points mesurés sur le col ou sur le fond. Les faits peuvent également représenter la présence d'information déduite, comme l'existence d'un cercle calculé sur les points mesurés sur le col. Les règles de calcul sont élaborées par le photogrammètre. Celles-ci permettent de calculer les attributs géométriques des objets en utilisant les faits et les valeurs par défauts des attributs, par exemple, Règle N :

S'il y a des points mesurés sur le fond de l'amphore et que le calcul du cercle du col a convergé, alors l'axe OZ de l'amphore sera déterminé par le bipoint (barycentre des points du fond, centre du cercle des points du col).

Ces règles de calcul sont employées par le système expert qui est, dans ce projet, le mécanisme de la déduction. Il convient de noter que les informations issues de cette première source de données sont sujettes à évolution. Chaque nouvelle amphore modifie les valeurs des attributs de cette source. En outre les règles des calculs, qui représentent la connaissance experte du photogrammètre, peuvent changer d'un photogrammètre à l'autre.

■ Le lien avec la photogrammétrie

Un ensemble de primitives géométriques simples servent à approximer ces particularités morphologiques et sont utilisées comme interfaces entre la mesure photogrammétrique et le modèle sous-jacent. La finalité de la mesure pouvant être double :

- détermination des positions et orientations des objets dans le référentiel général du navire ; il s'agit ici de mesurer un objet dont la morphologie générale nous est donnée a priori. Dans le cas présent, le module de mesure est prévu pour la

■ ■ ■ mesure des amphores de PY4-GRF1 à 4. C'est-à-dire les quatre classes d'amphores isolées, descendantes de la classe Py 4, sans tenir compte des quelques amphores de type Py 5, des quatre massaliètes, de l'amphore grecque d'Egée septentrionale et des deux ou trois grecques de Calabre de cette épave. La spécificité de la mesure de ces classes tient essentiellement aux valeurs par défaut qui diffèrent, la forme générale restant identique.

- Les mesures donnant lieu au calcul des positions et orientations de l'amphore peuvent également servir à déterminer des caractéristiques intrinsèques de l'amphore, données qui sont généralement mesurées par une autre méthode quand l'amphore est remontée à la surface. Une détection de conflit entre la mesure photogrammétrique et ces données extérieures est mise en place sans toutefois qu'une décision soit prise par le système. Ces problèmes de fusion de données hétérogènes de détection de faute et d'incohérences, de mise à jour et de révision de données ne seront pas abordés dans cet article. Nous travaillons sur ces sujets dans le cadre d'une thèse de doctorat de M. Julien Seinturier, co-encadré par Mme Odile Papini, professeur à l'université de Toulon et du Var [Papini, 2001] et plus généralement avec Mme Camilla Schwind [Schwind 2003].

La mesure photogrammétrique est supportée par quelques points stratégiques de l'amphore (pointillé sur le schéma Figure 4, à droite). Cinq zones servent à définir, de façon redondante, les paramètres de définition du référentiel de l'amphore. Si la mesure s'avère impossible sur certaines parties, le mécanisme de détermination du référentiel utilise les relations entre amphores (si elles existent) ou des valeurs par défaut. Le problème d'inférence de valeurs fondées sur des données incomplètes ou devant être remise en cause est fréquent en archéologie. On peut consulter avec intérêt les travaux de Claire Reeler qui utilise la logique floue pour formaliser cette incertitude ([Reeler, 1996-1], [Reeler, 1996-2]).

Les informations contenues dans la source S1 vont au delà des aspects géométriques. Un ensemble de données non gra-

phiques (bibliographie, iconographie) entrant dans la définition du "modèle" ne seront pas traitées dans cet article.

La seconde source : le relevé photogrammétrique

La seconde source de données (S2) provient des mesures photogrammétriques obtenues à l'aide des photographies prises sur le site. Ces informations sont de trois types : position et orientation des photographies dans le référentiel général du site, position et orientation des amphores identifiées et mesurées, détermination de quelques attributs morphologiques. Pour chaque amphore observée sur au moins deux photographies, l'archéologue identifie le type de l'amphore et choisit une classe suggérée par le système, issue de la première source de données (S1). Une instance est créée et nommée de façon univoque, l'utilisateur peut alors commencer la phase de mesure. Les mesures ne peuvent être faites que sur les primitives géométriques définies dans le modèle (source S1). La morphologie complète de l'amphore sera déduite de ces primitives géométriques. Ces mesures sont fortement incomplètes car les amphores ne sont vues que partiellement sur les photographies et par ailleurs beaucoup d'entre elles sont en parties brisées ou envasées. Le rôle du système expert et de la phase de déduction sera de compléter ces observations et, après la fusion des sources S1 et S2, de proposer un modèle complet de chaque instance.

Fusion de données

L'obtention d'une représentation 3D complète de l'amphore passe par la fusion des mesures photogrammétriques (S2) et du modèle théorique (S1). Ces deux sources de données fournissent l'information sur les zones remarquables des amphores, définies par l'archéologue. La méthode de fusion est fournie par inférence sur les sources de données et produit une liste d'actions à réaliser. Dans un second temps, la fusion est effectuée selon les actions correspondantes aux faits générés.

Création de la base de croyances (KB)

KB est la représentation logique de l'état des données présentes dans les sources S1 et S2. Elle se compose de deux sous-ensembles : la base de faits, issue de S2 et de S1, pour les valeurs par défaut et la base de règles, issue de S1. On met en place une base de faits donnant des informations sur les données présentes dans S1 et S2. Pour cela, un fait est associé à chaque donnée présente dans les sources. Cette méthode est une simple application de l'hypothèse du monde clos souvent utilisée dans le domaine des bases de données. Exemple : considérons que S1 contienne une hauteur ainsi que le diamètre de panse d'une amphore et que S2 contienne les mesures de la panse et d'une des anses. La base de croyances KB contiendra alors les faits S1height, S1bellyradius, S2belly, S2handle1, chacun déterminant l'existence de données dans la source spécifiée. On complète ensuite KB avec une base de règles qui permettra d'indiquer comment fusionner les sources. Les règles utilisent les faits de la base de croyances pour en générer de nouveaux, ceux-ci représentant les actions à effectuer pour la fusion. Une règle peut être décrite comme une expression *si... alors...*, par exemple : *si fait1 et fait2 alors action3*.

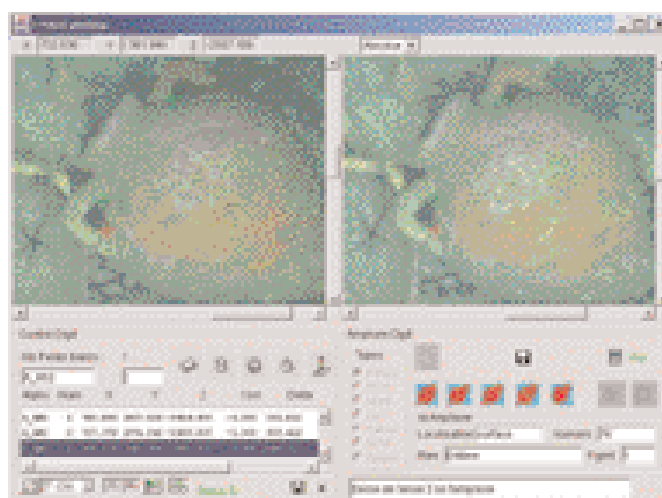


Figure 5. Interface de saisie d'amphore dans l'Arpenteur. La saisie se fait conformément à un modèle théorique et est connectée à une base de données distante.

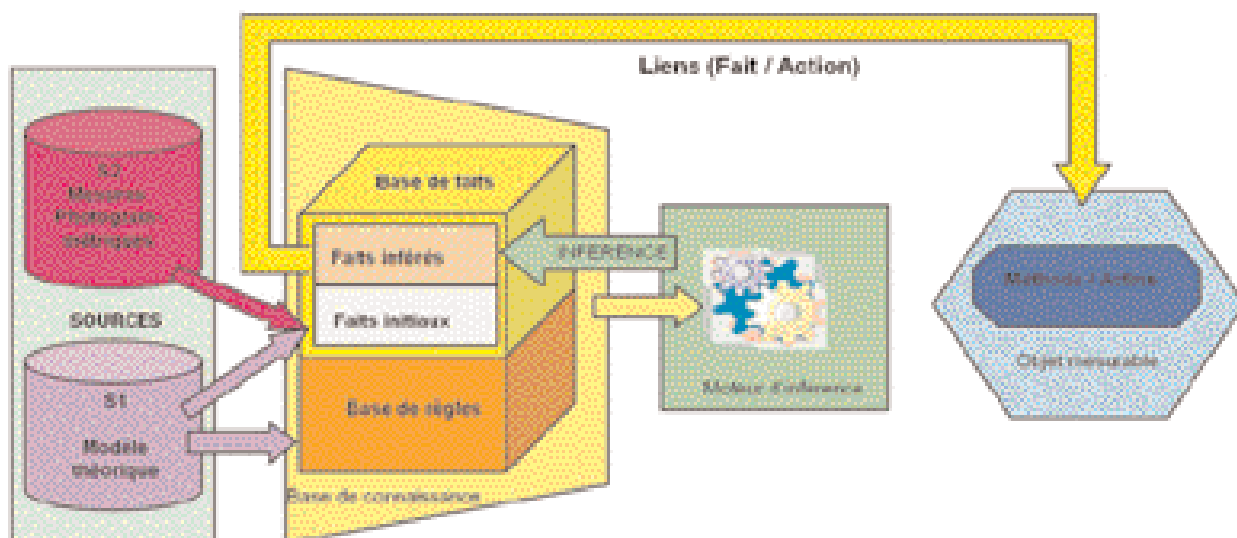


Figure 6. Des sources de données à la représentation complète de l'objet : Fonctionnement du Système Expert.

Technique de fusion des sources

Une fois la base de croyances construite, un système permettant la saturation de la base de faits doit être mis en place. Saturer la base de faits consiste à déduire tous les faits possibles à partir des règles. La technique utilisée pour cela est l'inférence en chaînage avant dont le moteur Jess (Java Expert System) [JESS, 2001] permet l'utilisation. A la fin de l'inférence, la base de croyance contient de nouveaux faits représentant les actions à mener pour procéder à la fusion des deux sources. En pratique, l'utilisation de Jess est possible uniquement grâce à un adaptateur entre la base de croyance, contenue dans un document XML, et les objets JAVA utilisés par Jess. Cet adaptateur est constitué d'un analyseur XML remplissant deux managers : un manager de formules logiques (pour les règles) et un manager de faits. La phase d'inférence est initialisée avec les deux managers passés en paramètres au moteur d'inférence. Une fois cette

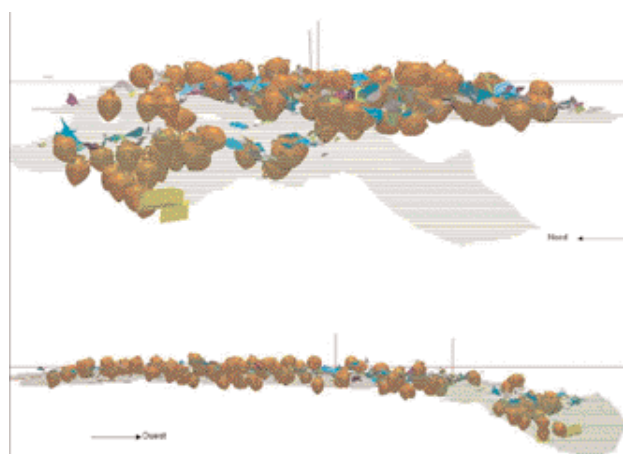


Figure 7. Représentation du site après les campagnes 2000 et 2001. Rendu des amphores avec MicroStation.

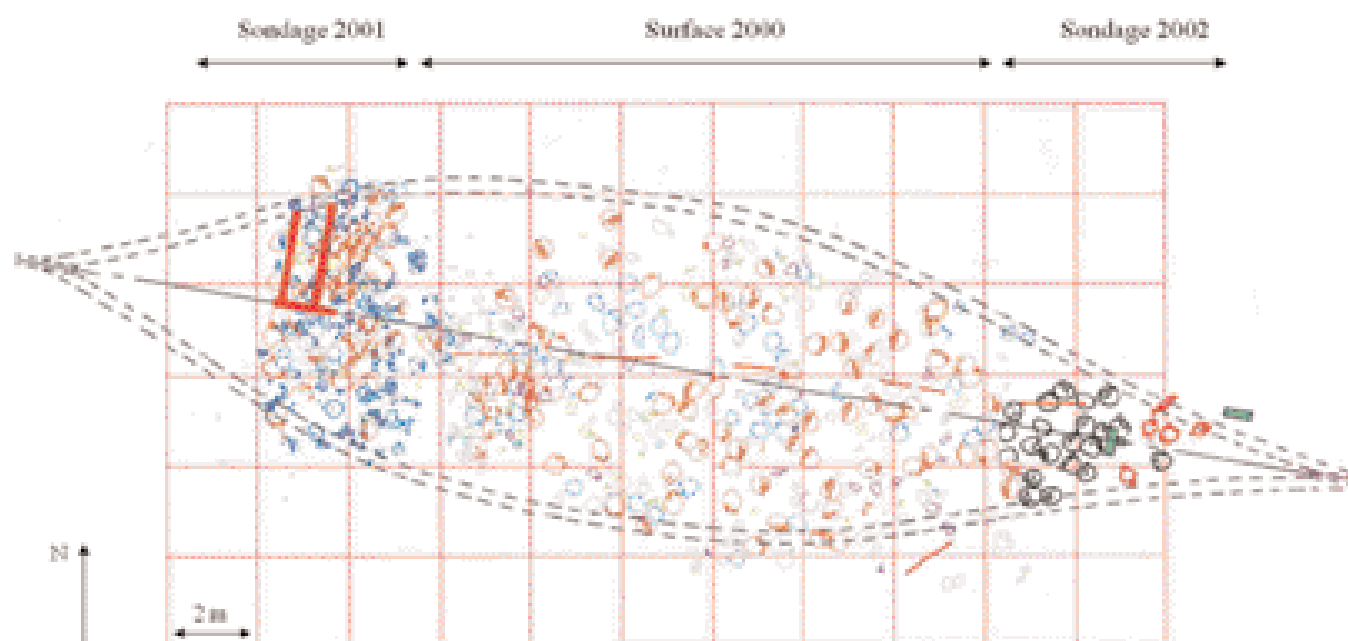


Figure 8. Sur la base des relevés des campagnes 2000, 2001 et 2002, une hypothèse de positionnement du navire

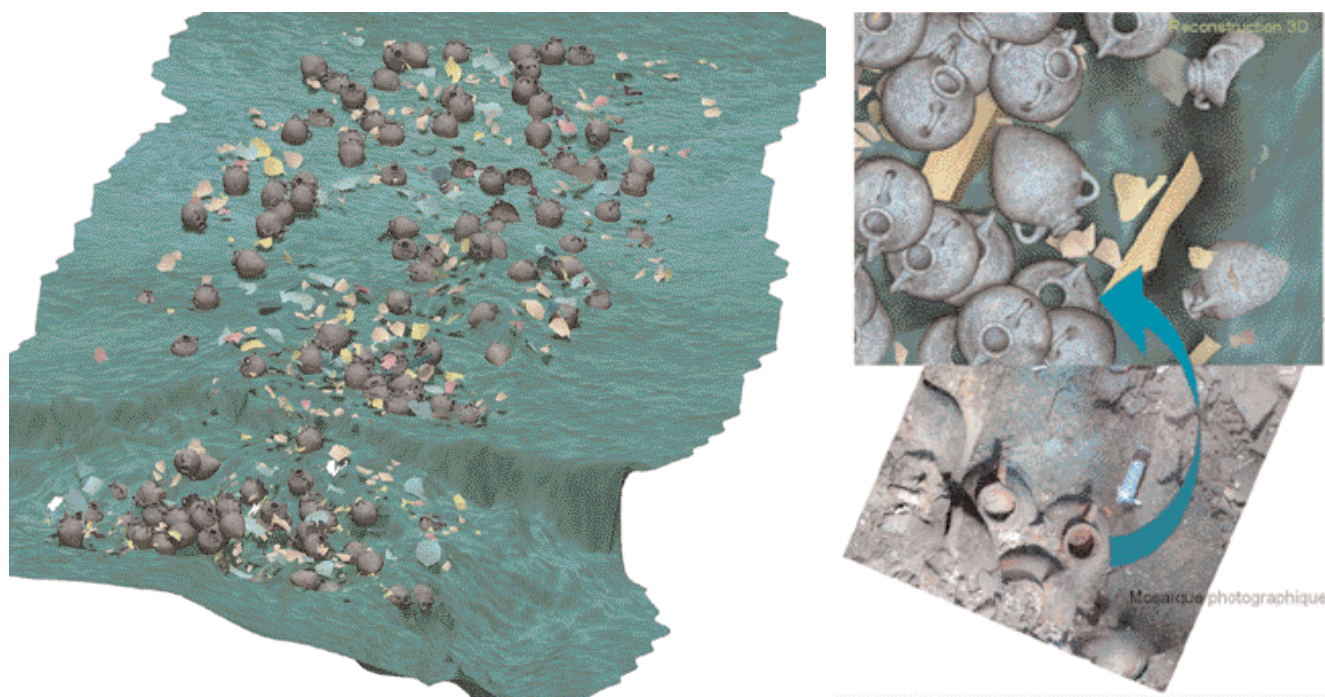


Figure 9. Vue générale du site et des différents sondages effectués (2000-2002). Représentation Microstation.

phase terminée, le manager de faits contient les faits initiaux complétés par les faits d'actions nouvellement inférés durant la saturation. La fusion par action est en fait le pont entre l'ensemble de faits produit par l'inférence de Jess et l'ensemble d'actions à accomplir sur l'objet de l'étude. Du point de vue de l'implantation, les instances sont des objets Java et l'appel du système expert se fait via une méthode générique: `logicalRestitution`. Une action est, dans ce contexte, une simple méthode Java que l'objet étudié appelle grâce au nom du fait d'action correspondant. Le principe sous-jacent étant que tous les objets mesurables de la hiérarchie possèdent un ensemble de méthodes élémentaires qui permettent le calcul de primitives géométriques comme le calcul de barycentre, de rotation, de translation, etc. Chaque action est associée à un fait homologue dans le modèle théorique (S1) et produit par l'inférence du système expert.

Résultats

Cette approche nous permet d'obtenir, malgré une vision partielle des amphores, une représentation de la cargaison relativement proche de la réalité, du moins de l'ensemble dégradé par le temps qui en résulte. Nous obtenons deux types de résultats, une forme textuelle, structurée en XML et un ensemble de représentations graphiques, directement généré par les instances Java: fichiers VRML et MicroStation™. Ces fichiers XML contrôlent toute l'information que nous possédons sur les objets mesurés et calculés: les photographies sur lesquelles ils sont vus, les caractéristiques géométriques calculées ou inférées par le système expert, la liste des faits mesurés, calculés ou inférés, les diverses remarques faites par les archéologues, etc. Le système permet d'atteindre les informations numériques de l'objet depuis sa représentation graphique afin par exemple de connaître l'origine d'un attribut (calcul sur des mesures photogrammétriques ou déduction depuis le modèle théorique).

Les visualisations tridimensionnelles proposées aux archéologues apportent une vision globale du site impossible à obtenir autrement: toutes les amphores sont visibles sur la même image depuis le début de la fouille. Les archéologues sous-marins retiennent effectivement du site une vision parcellaire toujours limitée à quelques mètres carrés dans un constant nuage de sédiment en suspension. Ici, ils peuvent du coup observer et mesurer les différentes couches d'amphores et utiliser les résultats graphiques obtenus pour échauffer de nouvelles hypothèses. Compte tenu des mauvaises conditions de travail sur l'épave, il était par exemple difficile de déterminer avec précision pendant la fouille le nombre de couches d'amphores superposées. A cette fin, en 2001, une tranchée transversale avait été implantée au niveau de la deuxième règle, à l'ouest, sur 2 m de large pour 5 m de long. Quatre pieds équipaient le ventilateur blaster qui émulsionnait le sable sur 3 à 4 m². Pour pouvoir dévaser toute la zone sélectionnée cet appareil, alimenté depuis la surface, fut déplacé à plusieurs reprises. Le dégagement des amphores en escalier et leur récupération par les plongeurs, ainsi qu'à l'aide d'une ventouse équipant le sous-marin, laissait percevoir l'enchevêtrement des couches de récipients auxquels il fallait ajouter ceux relevés en surface l'année précédente. Après le démontage, sont apparues au fond de la tranchée, à 1,6 m dans le sédiment, deux membrures et la carlingue du navire. Toutefois, lors de ces sondages, la forme même de l'excavation, en entonnoir étagé, et la chute constante de sable et de tessons ne facilitaient pas le comptage direct des objets. En outre, beaucoup d'amphores fissurées par le long séjour marin, s'étaient rapidement disloquées une fois dégagées, ce qui contrariait notre interprétation. Ignorant tout de la forme de la carène, le nombre exact des couches dans cette partie de la cargaison constituait cependant une information majeure pour le calcul du tonnage du navire. Les observations faites in situ, le dépouillement des premières images et les

reconstitutions à terre, par empilement des récipients, laissaient envisager l'existence à peu près certaine de quatre couches et probablement de cinq. Mais les premières restitutions photogrammétriques de ce secteur et la reconstruction de la cargaison dans le sondage démontrent assez nettement aujourd'hui l'existence d'une sixième couche. Sur la figure 7 en haut, complétée par la figure 9, à droite, on distingue les deux amphores disposées en fond de cale entre les deux membrures du navire. Imbriquée juste au dessus prend naissance la deuxième couche, avec parfois un récipient un peu plus haut que les autres puisque son pied repose sur le sommet de la membrure. Si la troisième couche est disposée verticalement comme les précédentes, les amphores de la quatrième et de la cinquième couche sont plus ou moins couchées. Enfin sous la surface du sable, la sixième couche est de nouveau clairement verticale. On considère dans cette interprétation que les 114 amphores de surface, relevées en 2000, se sont désolidarisées de la sixième couche durant le choc lorsque le bateau a touché le fond, au moment du naufrage.

Ainsi, si l'on tient compte des dimensions du navire, de l'emprise au sol du chargement (évaluée au minimum à 80 ou 70 m² en surface et à 60 ou 50 m² en fond de cale) et des premières restitutions 3D de la cargaison, qui doivent nécessairement intégrer les espaces perdus dans lesquels s'inséraient les structures du navire (mâts, épontilles, carlingues...), nous sommes enclins à penser que l'épave renfermait au moins un millier d'amphores, soit une charge d'une quarantaine de tonnes. Les quatre cents amphores déjà prélevées à ce jour, à la fois à la surface du site et dans les sondages, confortent ces estimations. Elles doivent être considérées comme minimales puisque ces excavations, implantées au total sur environ 30 m², ne couvrent en gros qu'un tiers du gisement.

■ Conclusions sur le relevé et la modélisation

Nous avons présenté un outil de représentation et de mise en scène des hypothèses archéologiques fondé sur une confrontation de mesures objectives et d'hypothèses. Un des objectifs décrit dans cet article est la visualisation de scènes déduites d'un minimum de points mesurés. Les aspects génériques des développements nous permettent d'étendre cette approche à d'autres types d'objets, en particulier des objets purement architecturaux.

Nous avons associé, avec l'aide de Jess, un moteur d'inférence à une base de connaissance d'objets mesurés dans un Système Expert capable d'assister la phase de mesure de ces objets et d'en produire une représentation idéale. Outre l'intérêt non négligeable d'utiliser des algorithmes d'inférence, l'utilisation d'un système expert apporte un niveau élevé d'abstraction dans la représentation de la connaissance d'objets mesurables. L'intérêt majeur du procédé, de notre point de vue, est l'insertion de connaissance associée à la géométrie des objets mesurés.

Cet outil permet à l'expert archéologue de faire un relevé photogrammétrique sans être un expert en photogrammétrie. Le rôle d'expert, ici, est plus d'insérer de la connaissance dans le système que de mesurer les caractéristiques géométriques de l'objet.

PUBLICATION DES RÉSULTATS: LE CHOIX XML

Le projet s'inscrit dans une histoire. L'informatisation d'une fouille archéologique implique une remise en cause importante des outils et méthodes utilisés auparavant. Les prémices du projet datent d'une demande de collaboration faite par le DRASSM auprès du MAP pour la réalisation d'une campagne de photogrammétrie sous-marine sur l'épave étrusque. L'occasion d'une collaboration plus riche et d'un projet plus global a donc été saisie dès ce moment. Les divers outils, à différents niveaux de développement, existaient au MAP-gamsau [Drap & Grussenmeyer, 2000], les interrogations sur le lien entre relevé photogrammétrique, représentation 3D et base de données, étaient déjà présentes ([Drap, Hartmann-Virnich, Grussenmeyer, 2000]). Il restait à synthétiser l'expérience et à proposer un modèle coopératif pour l'équipe tout en développant les outils de photogrammétrie et l'application au milieu sous-marin. Le projet a reposé très tôt sur le choix d'XML comme langage de structuration et de sauvegarde des données, qu'il s'agisse des données internes au système, photogrammétrie et configuration générale, ou des données archéologiques.

De fait, XML ([XML, 2000],) est un format d'échange de données autorisant une forte interopérabilité entre logiciels et équipes diverses. Depuis 1999, ces standards de communication se répandent dans le milieu informatique et dans des domaines connexes à la photogrammétrie comme les Systèmes d'Informations Géographiques, (GIS en anglais). Le Consortium OpenGIS a élaboré plusieurs spécifications pour définir les structures de données, par exemple les transformations de coordonnées [OpenGIS, 2001]. Dans un autre contexte, plus archéologique, l'Oriental Institute de l'Université de Chicago [XSTAR, 2004] développe le format Xstar pour la structuration de données archéologiques en XML. Enfin, notre dernier centre d'intérêt est la représentation 2D et 3D. En 2D le format SVG, Scalable Vector Graphic) permet de combiner en XML données raster et vectorielles ([SVG, 2001]). En 3D, le consortium VRML (Virtual Reality Modeling Language) est passé du stade des recommandations à celui de la standardisation (voir [VRML, 1997]). Il débouche maintenant sur un format de représentation de données géométriques entièrement en XML: X3D (voir [WEB_3D, 2004]).

Comme on a pu le voir dans la première partie de l'article, sur la figure 1, l'ensemble des données mesurées est formalisé en XML et les interfaces d'accès à ces données utilisent des



Figure 10. Orthophoto géoréférencée et superposition des artefacts mesurés. Interface SVG d'accès aux données archéologiques enregistrées dans les différents fichiers XML.

- ■ ■ formats graphiques XML (SVG et X3D). Cette cohérence des formats pour la représentation des données textuelles, raster et 3D, permet la génération à la volée de code X3D ou l'accès aux données textuelles depuis une interface SVG. On peut voir sur la Figure 10 l'orthophoto du site, géoréférencée avec une représentation graphique 2D de l'ensemble des artefacts en SVG, générée automatiquement. Ces développements entrent dans un projet plus vaste ISA-PX, (Information System for Archaeology, Photogrammetry and XML) dans la partie SVGX, et l'interrogation est développée par Anne Durand, ingénieur de Recherche au MAP.

DÉVELOPPEMENTS EN COURS ET EN PROJET

Visualisation et interaction

L'intérêt de la visualisation d'une maquette 3D pour l'archéologie à l'échelle de l'édifice n'est plus à démontrer (Paul Reilly dès 1990 dans un article intitulé *Towards a virtual archaeology* publié lors des rencontres CAA – *Computer Applications in Archaeology* – à Southampton décrivait clairement l'intérêt de l'élaboration d'un modèle 3D et de sa visualisation). Depuis cet aspect a été largement étudié et de nombreuses études théoriques sur la reconstruction du passé ont été menées à bien. (Voir à ce propos la synthèse de Juan A. Barceló [Barceló, 2000]).

■ SVG, une interface légère, simple et conviviale

SVG, acronyme de Scalable Vector Graphic, ([SVG, 2001]), permet de publier dynamiquement sur le web, grâce à un visualisateur gratuit (sur le site de Adobe) des données raster et vectorielles. L'interface est très intéressante, l'aspect XML permet la transformation à la volée d'informations, mais ne résiste pas à une trop grande quantité de données. Cette limite est vraiment pénalisante et limite son utilisation à des cas particuliers.

■ Les limites de VRML

Le langage de description de scène 3D VRML est bien adapté à une visualisation rapide et simplifiée. Couplé à un langage de script tel que PHP, il permet également un interfaçage simple et efficace vers un SGBD relationnel dans le sens de la consultation. Dans ces limites d'utilisation, il remplit parfaitement son office et de nombreux projets de recherche l'utilisent (par exemple le projet d'un musée virtuel dédié à l'évolution d'une ville, développé par Maria Elena BonFigli et Antonella Guidazzoli [BonFigli, Guidazzoli, 2000] ou bien avec une solide interface JAVA 2D, les travaux pédagogiques sur les SIG de Kate Moore, Jason Dykes et Jo Wood, Université de Leicester, [Moore, Dykes, Wood, 1997]). Néanmoins, VRML souffre d'un manque de portabilité (aucun visualisateur performant et gratuit n'a été développé pour les systèmes unix) et manque énormément de souplesse quant à la mise à jour dynamique du modèle 3D. La scène est décrite dans un fichier et les liens vers l'extérieur (URL vers un SGBD par exemple) sont également codés dans le fichier. La modification dynamique du contenu d'une scène VRML est une opération lourde, très peu portable et limitée dans ses possibilités.

■ Les apports de X3D

X3D souffre des mêmes défauts que son "ancêtre" immédiat le VRML, mais il est nettement plus récent. En outre, les visualisateurs gratuits ne sont pas encore à la hauteur de ceux développés pour le VRML. Cependant, X3D est du XML pur et autorise à ce titre toutes les transformations et requêtes possibles en XML. Par exemple, il est possible de passer de la représentation globale des données en XML à une représentation graphique 3D par une simple transformation XSL.

■ L'ouverture de JAVA 3D

Depuis la version 2 de Java (Java 1.2 et 1.3), une bibliothèque graphique 3D est mise à disposition. Comme VRML, JAVA 3D propose un graphe de scène et une structure claire de l'espace représenté. Les concepteurs de JAVA 3D sont impliqués dans le développement de VRML et proposent un ensemble de ponts et traducteurs entre ces formats (principalement dans le sens VRML/Java3D). Les avantages évidents de JAVA 3D sur VRML résident en deux points :

- JAVA 3D est une bibliothèque JAVA et peut donc être utilisée directement depuis le langage de développement du modèle. Le lien entre représentation graphique et modèle devient alors intime et il est possible d'envisager facilement un lien bidirectionnel entre le modèle objet et sa représentation graphique, donc entre un gestionnaire d'objet persistant, l'objet acteur et sa représentation graphique.
- La visualisation d'une scène n'est plus liée à un outil de rendu 3D rare et peu portable et ne dépend plus que de la présence de la bibliothèque JAVA 3D sur la machine hôte. JAVA 3D est distribué pour la grande majorité des systèmes informatiques actuels.

■ Les CAD

Les méthodes de visualisation présentées jusqu'ici permettent un accès dynamique et interactif aux données 3D ainsi qu'aux données textuelles liées mais ne permettent pas une étude métrique des scènes représentées. Les besoins des archéologues ne se limitent pas à la visualisation mais recouvrent également les problèmes d'élaboration de plan, de courbe de niveaux, de cubature, etc. Nous générons donc dans le même temps un fichier représentant la même scène mais dans le format du logiciel MicroStation de Bentley.

■ Conclusions sur la représentation graphique

Le choix d'un ou de plusieurs formats graphiques de représentation est toujours problématique. Actuellement, nous utilisons de façon systématique quatre formats différents : SVG, VRML, X3D et Microstation, occasionnellement JAVA 3D.

Aucun n'est pleinement satisfaisant. La contrainte majeure réside dans le fait que les fichiers doivent pouvoir être générés automatiquement par programme, le format doit donc être connu et stable. Ce dernier aspect, la stabilité, nous a conduit à écarter définitivement DXF. JAVA3D semblait être une solution originale et satisfaisante mais les difficultés d'installation pour des non informaticiens en font un outil limité à une petite communauté. De plus chaque tentative d'adoption d'un nouveau format est coûteuse en temps.

Fusion de données

Le contexte des connaissances spatiales implique la gestion de différents types de données, provenant de différentes sources caractérisées par des degrés de confiance divers. ([Shi, 2000], [Peled, Raizman, 2000]) Ces données sont de qualités très inégales, incomplètes, incertaines et peuvent entrer en contradiction, elles conduisent à la définition d'une stratégie d'agrégation ou de fusion. Un certain nombre de travaux ont été réalisés, dans les domaines de la représentation des connaissances, d'aide à la décision ou encore des bases de données, cependant les opérations de fusion proposées ne sont pas réversibles, ce qui reste problématique dans les applications réelles.

La seconde partie de ce travail est l'étude de la réversibilité pour la fusion de sources multiples, elle pourra être abordée en deux temps :

- D'un point de vue théorique, il s'agira, tout d'abord d'étudier la réversibilité des opérateurs de fusion présents dans la littérature et de proposer des méthodes de fusion réversibles efficaces. Cette étude pourra s'appuyer sur les travaux effectués sur la réversibilité des opérateurs de révision, en particulier avec une représentation de pré-ordres par des polyômes [Papini, 2001].
- D'un point de vue pratique, il s'agira d'étudier la mise en œuvre des opérations de fusion réversibles par l'adaptation des algorithmes existants pour la fusion non réversible et/ou la proposition de nouveaux algorithmes efficaces pour réaliser la fusion réversible.

Cet aspect du problème est développé dans le cadre de la thèse de M. Julien Seinturier, co-encadré par Mme Odile Papini et Pierre Drap.

Conclusion

Comme P. Pomey l'avait déjà signalé, il y a vingt ans [Pomey 1985], les épaves profondes ont toutes les chances d'être mieux conservées que les autres. A cette époque, l'épave romaine Bénat 4 découverte par 328 m de fond, à l'est de Toulon, inaugurait une longue liste de navires antiques qui ont tous échappé aux récifs destructeurs et atteint le fond sans gros dommage. Le pourcentage de fracturation des amphores de cette épave restait visiblement très limité et la forme du bateau encore perceptible. Il fut ainsi relativement aisé, lors d'une plongée d'expertise avec la soucoupe Cyana (Ifremer) en 1981, de localiser en marge du chargement les objets du bord disposés à l'arrière du navire. Sur l'épave *Arles 4*, découverte par la même soucoupe plongeante en 1989, à 662 m de fond, face au grand Rhône, les ancres du navire étaient parfaitement décelables à l'avant d'un énorme chargement d'amphores de Bétique (Andalousie). Phénomène extrêmement rare, une partie des membrures du navire, sans doute hors de portée des vers xylophages à cette profondeur, dépassaient encore du sédiment. Si le chargement de l'épave Bénat 4 ne comprenait qu'un seul type d'amphores, l'organisation sur deux couches de celles de l'épave *Arles 4*, réparties en cinq zones au dessus d'une cargaison de galettes de cuivre, restait également très compréhensible. Par miracle, certains réci-

pients présentaient encore des cartouches à inscriptions peintes, parfaitement visibles en pleine eau.

La démonstration était donc faite que les épaves profondes, situées généralement au large où se combinent divers facteurs très favorables à la conservation des matériaux habituellement périssables (obscurité, basse température, faible taux d'oxygène) pouvaient échapper aux organismes marins les plus redoutables. Une autre qualité et non la moindre résidait dans leur lisibilité directe, qui permettait de comprendre avec plus de facilité là qu'ailleurs l'agencement d'un navire sans entreprendre de trop gros travaux de dévasage le plus souvent irréalisables par les méthodes traditionnelles. Situées au delà des zones d'herbier, épargnées par le concrétionnement et par la sédimentation toujours très forte près des côtes, ces vestiges du passé étaient pour une fois offerts sans difficulté à l'analyse des scientifiques. C'est ainsi que l'épave *Grand Ribaud F*, riche par sa cargaison propre et par l'extrême rareté des bateaux étrusques d'époque archaïque, présentait un enjeu considérable pour la recherche archéologique et scientifique. Située à la limite de la plongée professionnelle et déclarée par la Comex, dont le PDG, Henri-Germain Delauze consentait à développer sur ce site un mécénat technologique, elle pouvait se prêter à une fouille novatrice, partiellement automatisée, et apporter dans le même temps des informations précieuses sur le commerce archaïque entre l'Italie et la Gaule. Mais la fouille d'une épave ou d'un site archéologique quelconque, quelle que soit sa profondeur, a toujours conduit les scientifiques à transposer l'objet de leur recherche, inexorablement détruit ou dégradé au fur et à mesure de l'étude – c'est ainsi le cas lorsque l'on démonte, on l'a vu, une à une les couches d'amphores – sous forme de données inventoriées et de représentations graphiques et spatiales. Si tout un arsenal d'outils, de supports et de techniques avaient permis jusque-là, dans cette capture de l'information, de garder une trace fidèle des gisements disparus, sous forme de liste, de plan, de calque, de coupe, de reconstitution 2D, les progrès technologiques et les avancées de la photographie et de l'informatique autorisent depuis ces dernières années la mise au point et la reconstitution de nouvelles représentations. A partir de l'enregistrement informatisé de toutes les données de la fouille, l'archéologue est désormais capable d'obtenir des représentations tridimensionnelles précises, et d'interagir dans des fac-similés fidèles construits au plus près du terrain et visualisable à l'aide de logiciels désormais courants. Ainsi, pouvons-nous considérer comme le faisait encore récemment Jean Leclant que "*désormais les techniques les plus modernes, avec toutes leurs promesses d'avenir, participent à la quête ardente de l'homme vers son passé*" ([Leclant 1996] page 7).

Mais au-delà du procédé de photogrammétrie sous marine appliqué lors de cette expérience à l'épave étrusque, il faut retenir la notion de modèle à partir duquel furent générés les fac-similés des artefacts issus d'un nombre restreint de points mesurés qui fournissent leurs positions, orientations et paramètres géométriques. C'est-à-dire que l'ensemble homogène des amphores composant la cargaison a été modélisé à partir d'un concept, enrichi de la lecture de chaque objet, avec ses mensurations et ses caractéristiques propres. C'est par ce

- ■ ■ principe rationalisant que l'archéologue a pu visualiser l'ensemble d'un site dont il n'avait acquis jusque là sur le terrain qu'une vision parcellaire.

Ainsi, les archéologues sous-marins pourront-ils, dans l'avenir, renoncer de plus en plus fréquemment à leur agilité innée d'homme-grenouille pour concentrer leurs efforts à bord d'un poste de commandement flottant, véritable "technocosme archéomatique" "Là, face à un écran de contrôle, ils actionneront tour à tour les commandes d'un engin de dévasage automatique, d'un bras télémanipulateur et d'un système d'enregistrement tridimensionnel restitué par ordinateur, avant de s'immerger dans le fac simile virtuel du gisement. Dans le même temps, la diffusion sur le net des ces précieuses informations recueillera l'avis éclairé, à l'autre bout de la planète, des meilleurs spécialistes. Ainsi, à la différence du commandant Cousteau et de son équipe qui, en 1952 à Marseille, avaient fouillé sans s'en apercevoir deux épaves romaines superposées, au pied du récif du Grand Congloué, ils pourront analyser immédiatement la situation et orienter au mieux la recherche de terrain, avec l'assurance de conserver une copie fidèle et intacte du site. ●

Références bibliographiques

- [Drap, Hartmann-Virnich, Grussenmeyer, 2000] Pierre Drap, Andreas Hartmann-Virnich, Pierre Grussenmeyer, *Photogrammetric stone-by-stone survey and archaeological knowledge, an application on the romanesque priory church notre-dame d'aleyrac*, VAST - Euroconference on Virtual Archaeology, Arezzo (Italy) 24 au 24 novembre 2000, (actes à venir)
- [Drap & Grussenmeyer, 2000] Pierre Drap & Pierre Grussenmeyer, *A digital photogrammetric workstation on the web*, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 55 N° 1. Official publication of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), ELSEVIER février 2000, pp.48-58.
- [Drap, Seinturier, Long, 2003] Pierre Drap, Julien Seinturier, Luc Long, "Archaeological 3D Modelling using digital photogrammetry and Expert System. The case study of Etruscan amphorae", The Sixth International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence Limoges (FRANCE) 14 au 14 mai 2003.
- [Leclant, 1996] Jean Leclant, *conception Maurizio Forte, Archéologie virtuelle, Le passé retrouvé*, Arthaud, 1996, 295 p.
- [Maas, 2000] Hans-Gerd Maas, "New developments in Multimedia Photogrammetry" Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- [Moore, Dykes, Wood, 1997] Kate Moore, Jason Dykes et Jo Wood, *Using Java to interact with geo-referenced VRML within a Virtual Field Course*, ICA, Visualisation Commission meeting, Stockholm, Suède, 1997
- [JESS, 2001] "JESS, The Java Expert System Shell" E.J. Friedman-Hill, September 2001 <http://www.sandia.gov/jess>
- [Papini, 2001] Odile Papini "Iterated revision operations stemming from the history of fan agent's observations" Frontiers of Belief Revision M.-A. Williams and H. Rott eds. Applied logic series. 22. Kluwer Academic publishers. Pages 279-301. 2001.
- [Pomey, 1985] Patrice Pomey, *Perspectives d'avenir pour l'archéologie sous-marine: l'archéologie en eau profonde*, in : Deuxième Journées d'Etude sur la Plongée Scientifique, Bulletin de l'institut Océanographique de Monaco, 4, 1985, p. 59-74.

- [Kwon, 1998] Young-Hoo Kwon <http://kwon3D.com/theory/dlt/refr.html>
- [Kwon, Lindley, 2000.] Young-Hoo Kwon, & Lindley, S.L. *Applicability of the localized-calibration methods in underwater motion analysis*. XVIII International Symposium on Biomechanics in Sports. Article consultable ici : <http://www.education.ed.ac.uk/swim/papers2000/kl2.html>
- [Peled, Raizman, 2000] A. Peled, Y. Raizman, *Three-dimensional digital photogrammetric update of the israeli national gis data base*, XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Geoinformation for all, Amsterdam 16-23 July 2000. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXXIII, Tome IV-3, pp 443, 448.
- [Reeler, 1996 - 1] Claire Reeler, *Fuzzy Logic, Neural Networks and the Analysis of pa Sites, Applications of GIS: Proceedings of Colloquium II*, UISPP XIIIth Congress, Forli, Italy, September 1996 Johnson, I. & North, M. (eds) 1997. Sydney University Archaeological Methods Series 5.
- [Reeler, 1996 - 2] Claire Reeler, *Beyond GIS: Artificial Intelligence in Archaeology, Applications of GIS: Proceedings of Colloquium II*, UISPP XIIIth Congress, Forli, Italy, September 1996 Johnson, I. & North, M. (eds) 1997. Sydney University Archaeological Methods Series 5.
- [Schwind, 2003] Camilla Schwind, "Inconsistent Query Answering from Weighted Causal Databases 1st International Workshop on Knowledge Representation and Approximate Reasoning" (KRAR'2003), Olsztyn, Pologne, 16-18 Mai 2003.
- [Shi, 2000] Zhongchao Shi, *GIS database revision -the problems and solutions*, XIXth Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Geoinformation for all, Amsterdam 16-23 July 2000. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Working Group IC WG IV/III.2, pp 494-501.
- [OpenGIS, 2005] *Implementation Specification: Coordinate Transformation Services (Revision 1.00)* Open GIS Consortium, Inc., OpenGIS Project Document 01-009. 12 January 2001. <http://www.opengis.org/techno/implementation.htm>.
- [SVG, 2001] *Scalable Vector Graphics (SVG) 1.0 Specification*, W3C Recommendation 04 September 2001, Jon Ferraiolo, <http://www.w3.org/TR/SVG/>
- [WEB_3D, 2004] Web 3D Consortium, Open Standards for Real-Time 3D Communication , <http://www.web3d.org/index.html>
- [XML, 2000] Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Second Edition), W3C Recommendation 6 October 2000, Tim Bray, Jean Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, Eve Maler, <http://www.w3.org/TR/REC-xml>
- [XSTAR, 2004] <http://oi.uchicago.edu/OI/PROJ/XSTAR/XSTAR.html>

Contacts

Pierre DRAP

MAP UMR CNRS 694, Ecole d'Architecture,
184 avenue de Luminy, 13288 Marseille Cedex 09, France
Pierre.Drap@gamsau.archi.fr

Luc LONG

D.R.A.S.S.M, Département des Recherches Archéologiques
Subaquatiques et Sous-Marines, Fort Saint-Jean, 13235
Marseille 02, France
Luc.Long@culture.gouv.fr