

# Photogrammétrie et archéologie sous-marine profonde

## Le cas de l'épave étrusque Grand Ribaud F

*Pierre Drap, Luc Long*

### Table of contents

1 Introduction.....	3
2 Le contexte du projet .....	5
2.1 L'épave étrusque Grand Ribaud F (Giens, Var).....	5
2.2 Photogrammétrie sous-marine au service de l'archéologie profonde.....	7
2.3 Les systèmes de gestion de l'information en archéologie.....	9
2.4 Le projet ARPENTEUR .....	9
2.5 L'élaboration d'un corpus spécifique.....	11
3 Photogrammétrie .....	15
3.1 Adaptation au milieu sous-marin.....	16
3.2 Le relevé des amphores.....	18
3.3 Conclusions sur le relevé et la modélisation.....	24
4 Publication des résultats : le choix XML .....	25
5 Développements en cours et en projet.....	26
5.1 Visualisation et interaction.....	26
5.2 Fusion de données.....	28
6 Conclusion.....	29
7 Références bibliographiques.....	30

7.1 Partie A.....	31
7.2 Partie B.....	32

## Résumé

Cet article concerne le relevé et la représentation du patrimoine archéologique sous-marin. Le procédé est fondé sur un outil de photogrammétrie piloté par un Système Expert utilisant une base de connaissance issue de l'expertise archéologique. Le relevé s'appuie donc sur la notion de modèle tant géométrique que cognitif et produit une représentation tridimensionnelle du site qu'aucun archéologue, soumis aux contraintes de la plongée profonde, n'avait pu observer par ses propres moyens. Cette approche a été testée avec succès sur la fouille de l'épave étrusque Grand Ribaud F, au large de la presqu'île de Giens (Hyères, Var, France). L'importance archéologique du site et sa grande quantité d'amphores ont été des facteurs déterminants dans le choix de l'épave comme terrain d'expérimentation. Au-delà du relevé et de la représentation du site, nous nous sommes intéressés à la persistance des données au travers d'un formalisme XML et à l'accès à ces données depuis les représentations géométriques générées, 2D et 3D. Un site Internet permet de consulter l'état d'avancement de ce projet et les derniers résultats archéologiques (<http://GrandRibaudF.gamsau.archi.fr>).

This article relates the survey and the representation of the deep underwater archaeological site. The process is founded on a photogrammetric tool controlled by an Expert System using a knowledge base resulting from the archaeological expertise. The survey is thus based on the concept of a geometrical and cognitive model and produces a three-dimensional representation of the site like no archaeologist, subjected to the constraints of the deep diving, had been able to observe himself. This approach was successfully tested on the excavation of the Grand Ribaud F Etruscan wreck, near the peninsula of Giens (Hyères, Var, France). The archaeological importance of the site and its great quantity of amphorae were determining factors in the choice of this wreck as experimentation. Beyond the survey site and its representation we were interested by the data persistence through XML formalism and how these data can be accessed from the resulting geometrical representation, 2D and 3D. An Internet site allows consulting the progress report of this project and the last archaeological results. (<http://GrandRibaudF.gamsau.archi.fr>).

Mots clés : Photogrammétrie sous-marine, Système expert, Archéologie sous-marine, Amphores étrusques, Base de données archéologique, Système d'Information Géographique, VRML, X3D, SVG, Java.

## 1. Introduction

Ce projet touche au problème du relevé et de la documentation archéologique ainsi qu'à celui de la réalisation d'un modèle 3D de l'état de l'épave étrusque Grand Ribaud F tout au long des différentes phases de la fouille. La première étape, l'acquisition des données, comprend deux temps : l'analyse préalable des besoins et la définition des procédures. La collaboration étroite avec les experts du domaine considéré, les archéologues, permet de définir leurs besoins spécifiques, comme le corpus des objets à mesurer, les différents types de données auxquels ils seront liés, mais aussi de définir quel sera l'utilisateur final. Cette phase donne lieu à des développements informatiques particuliers pour rendre compte des spécificités du corpus étudié (élaboration de modèles théoriques, de mécanismes de valeurs par défaut, de règles de mesure, etc...).

Dans un second temps, la campagne de mesure, puis la génération de données 3D à partir des outils de photogrammétrie standard, ici Photomodeler de Eos1

Eos Systems Inc. <http://www.photomodeler.com/>

produit de la géométrie classique avec des résultats à présent courants tel que DTM ou orthophoto. S'appuyant sur le résultat des orientations obtenues avec Photomodeler, la dernière phase de mesure photogrammétrique se fait avec l'ARPENTEUR, logiciel développé au MAP depuis 1999. La génération de données 3D est alors conduite par des experts du domaine concerné (archéologues, biologistes, architectes, ...) et produit de la géométrie liée à des connaissances spécifiques du domaine étudié. Ce compte-rendu est scindé en deux articles distincts. Le premier fait état ici des problèmes posés à l'archéologue et de ses besoins en matière de reconstruction 3D, tandis que le second traitera de la photogrammétrie et de ses apports dans l'étude d'une épave profonde.

Figure 1. Schéma synoptique du processus de mesure. Depuis l'analyse jusqu'à la publication des résultats.

L'outil de photogrammétrie numérique, l'ARPENTEUR, est fondé sur l'idée d'un processus de mesure guidé par la connaissance liée au domaine étudié. En archéologie comme en architecture, le but est de permettre à l'expert (l'archéologue ou l'architecte) d'utiliser son expérience et ses connaissances du milieu et des objets dès la phase de mesure. Le dernier développement du projet qui est présenté ici fusionne des données mesurées à un modèle théorique afin d'obtenir une représentation complète d'un objet partiellement mesuré.

Le projet a été expérimenté sur une fouille archéologique sous-marine : l'épave étrusque profonde Grand Ribaud F découverte en 1999 au large de Hyères, France. L'épave est d'un grand intérêt archéologique par sa chronologie, qui la situe en pleine période archaïque, par l'importance de sa cargaison et par son excellent état de conservation.

La gestion de données est l'un des problèmes majeurs d'une fouille archéologique. Elle se

heurte à plusieurs types d'obstacles :

1. Les données manipulées sont fortement hétérogènes (outre l'aspect multimédia important, l'utilisation de technologies diverses et sophistiquées accroît les difficultés de gestion, de présentation et d'analyse),
2. Plusieurs acteurs sont susceptibles de vouloir les consulter simultanément, voire de les réviser,
3. Ces données sont susceptibles d'évoluer au cours du temps (mises à jour, détection d'erreurs d'interprétation, modification des hypothèses de modélisation).

À l'issue de la présentation du projet, de celle du site archéologique, et d'une brève introduction des systèmes de gestion d'information en archéologie comme des divers outils à notre disposition, nous aborderons l'aspect photogrammétrique, scindé en deux phases distinctes. Ce sera d'abord le cas du relevé « traditionnel » avec Photomodeler, puis des objets manufacturés, élaborés selon un modèle a priori géométrique. Évidente pour les objets industriels contemporains, cette approche se justifie également pour des productions plus anciennes telles que les amphores étrusques ou romaines.

Enfin, nous aborderons les résultats archéologiques et nous accéderont aux données archéologiques à partir de leurs représentations géométriques.

## 2. Le contexte du projet

### 2.1. L'épave étrusque Grand Ribaud F (Giens, Var)

L'épave étrusque Grand Ribaud F (Giens, Var)

Image1  
Image2

Figure 2. Vue du site avant la première prise de vue en Août 2000.

Sur la photo de gauche, on peut voir le ROV super Achille, sur la photo de droite les submersibles de la Rémora 2000 de la Comex en phase de prélèvement des amphores à l'aide d'un système de ventouse. (Photo : F. Bassemayousse)

Si les navigateurs étrusques furent parmi les premiers, dès la fin du VII<sup>ème</sup> siècle avant J.-C., à construire un réseau d'échanges sur les rivages du Midi gaulois, on ne connaissait que trois épaves étrusques très pillées en Méditerranée française. La découverte en 1999, par la Comex, sous la houlette d'Henri-Germain Delauze, d'une épave bien conservée, chargée d'amphores étrusques et de marchandises variées, apporte désormais des données nouvelles sur le commerce d'époque archaïque. Le gisement se situe par plus de 60 m de fond, au large de l'îlot du Grand Ribaud (Hyères, Var, France).

Une première expertise, en 2000, et deux sondages, en 2001 et 2002, furent dirigés par le Drassm (Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines, Ministère de la Culture), avec les moyens logistiques de la Comex. Grâce à l'expérience déjà acquise sur des gisements profonds, ces campagnes de fouille ont permis de tester et de valider de nouvelles méthodes, le plus souvent sans plongeur. Il fut notamment procédé à une couverture photogrammétrique des vestiges par robot et sous-marin et à plusieurs sondages profonds au moyen d'un ventilateur.

Ce diagnostic confirme l'importance historique et l'excellent état de conservation de l'épave, chargée sur plusieurs couches d'environ un millier d'amphores, de vases en bronze empilés et de céramiques étrusques et grecques de belle facture.

L'étude du mobilier permet d'avancer quelques hypothèses sur l'origine du chargement. Les amphores appartiennent toutes au type 4 individualisé en Languedoc par F. et M. Py. Dans cette région, l'arrivée massive de ce type d'amphores se situe entre 525 et 520. La plupart des bouchons de liège ont été retrouvés dans les récipients, poussés à l'intérieur par la pression. Des restes de sarments de vigne et les traces d'usure observées sur les amphores attestent qu'elles étaient calées avec du feuillage et solidement arrimées entre elles par des liens. L'examen de la pâte révèle une production homogène, caractéristique de l'Etrurie méridionale. On pense à la région de Caere (Cerveteri), grande cité exportatrice de vin, connue également pour ses ateliers de bronziers, dont le port d'embarquement principal était Pyrgi (Santa Severa).

Les bassins en bronze empilés et les disques à rebord perlé trouvés dans le navire étaient connus en Gaule dans les sépultures riches de la région d'Aix-en-Provence et aux alentours de Lattes.

Quant à la céramique mise au jour lors du dévasage, elle correspond à un complément de fret qui se répartit en trois catégories distinctes. Il s'agit d'abord de vases grecs à vernis noir représentés par des coupes attiques de type Bloesch C, à pied à tige, d'un type légèrement postérieur à celles de l'épave grecque Pointe Lequin 1A (Porquerolles, Var) datée vers 515 avant J.-C. On note également parmi ces productions grecques un askos oriental à « Figures noires » et bandes peintes. Cette vaisselle, qui constitue un excellent « fossile-directeur » pour la période archaïque, situe le naufrage dans le dernier quart du VI<sup>ème</sup> siècle, sans doute aux alentours de 500 avant J.-C.

Un deuxième groupe d'origine étrusque comprend des urnes ovoïdes, une coupe basse de type buccheroïde et trois mortiers dont la pâte est proche de celle des amphores. La dernière catégorie s'apparente à des urnes et des cruches en pâte claire dont l'origine exacte, étrusque ou grecque, n'est pas clairement définie.

Sur l'arrière du navire, le mobilier de bord se composait d'une meule, une pointe de lance en

fer, une olpe en pâte claire et d'un petit nombre d'amphores diverses : grecques, massaliètes et étrusques. Ces dernières, différentes de celles du chargement, sont proches du type Py 5. Parmi le groupe d'amphores grecques, l'une d'elle, originaire de Calabre, portait sous la lèvre un nom d'origine étrusque qui désigne vraisemblablement un marin du bord. Du coup, si la présence d'amphores grecques parmi le mobilier de bord pouvait suggérer l'hypothèse d'un bateau grec ou massaliète se livrant à la redistribution de produits étrusques, le fait que l'une de ces amphores porte une signature étrusque paraît plaider en faveur d'un équipage toscan.

Bien conservée sous le chargement, la coque du navire a été explorée au cours de deux sondages profonds, après le démontage de la cargaison. L'un a été implanté au sud-ouest et l'autre à l'est, sur l'extrémité arrière de l'épave, où fut découvert le gouvernail latéral, conservé sur une hauteur de 1,24 m. La caractéristique des membrures et l'abandon partiel de la liaison par ligature au profit de l'assemblage par tenon et mortaise, à l'exception des extrémités du navire, nous renvoie directement à l'épave grecque archaïque Jules Verne 7, découverte dans le port de Marseille. Quoi qu'il en soit, l'épave Grand Ribaud F s'apparente visiblement au plus gros navire connu à ce jour pour la période archaïque.

La comparaison entre le chargement, originaire d'Étrurie méridionale, et le mobilier mis au jour sur le site portuaire de Lattes et sur les oppida de l'arrière-pays désigne logiquement cet horizon barbare comme principale destination du navire. De fait, les cordages qui arrimaient les récipients entre eux sur l'épave, renforcent l'idée d'une masse homogène, unitaire et soigneusement scellée, qui échappe au commerce mixte et à la distribution par relais que sous-entend l'emporion grec.

Les prochains objectifs consistent à réunir la logistique et les financements nécessaires à une fouille globale du site. D'un haut niveau technologique, cette mission posera dans le même temps les bases d'une nouvelle forme d'archéologie sous-marine où le plongeur devra céder sa place aux engins actionnés à distance. Ainsi, sur cette épave exceptionnelle les archéologues tenteront d'asservir les progrès technologiques aux rigoureux impératifs de la recherche scientifique.

## **2.2. Photogrammétrie sous-marine au service de l'archéologie profonde**

Quelques fouilles d'épaves, en France, à des profondeurs accessibles à l'homme, ont donné lieu à des photogrammétries avec restitutions tridimensionnelles. Ce fut d'abord le cas en 1975 de l'épave d'amphores romaines de la Madrague de Giens, puis en 1986 sur le site Grand Ribaud D, chargé de dolia ([Hesnard, 1988]) et sur celui des blocs de calcaire de Carry-le-Rouet (Long, 1988).

Mais, par la rapidité de sa mise en place qui évite désormais le recours aux cadres et aux portiques pesants, la photogrammétrie s'est avérée très efficace depuis ces dernières années

dans le domaine des gisements profonds. Du coup, profitant de l'expérience acquise depuis près de quinze ans sur plusieurs gisements archéologiques qui échappent à la plongée classique à l'air, la fouille de l'épave Grand Ribaud F marque par ses propres innovations une étape supplémentaire dans le développement de l'archéologie sous-marine à grande profondeur ([Long 1995 ; 1998]). Nous y avons testé et validé de nouvelles méthodes, même si la hauteur d'eau n'interdisait pas totalement le recours aux plongeurs lorsque la nécessité s'en faisait sentir<sup>2</sup>

Avec les équipages de L'Archéonaute (Drassm) et du Minibex (Comex), les plongeurs qui se sont succédés sur l'ensemble des trois opérations étaient (par ordre alphabétique) : F. Bassemayousse, O. Benslimane, J.-C. Cayol, C. Chary, N. Cler, X. Coquoz, G. Dauphin, H.-G. Delauze, A. Del'homme, J.-D. Ferré, S. Fontaine, E. Gottwalles, J. Gory, N. Gilbert, P. Giustiniani, R. Graille, P. Grandjean, S. Greck, A. Grousset, O. Hulot, J.-P. Joncheray, P. Lauric, L. Leru, L. Long (chef de mission), D. Mageaud, S. Marlier, C. Marshal, J.-M. Mazier, S. Mercier, P. et S. Périno, Popof Tcherniomordick, J. Ramone, M. Rival, N. Rouers, G. Savon, M. Tavernier, J. Toulet, L. Vanrell, J.-L. Verdier, B. Vicens et Jo Vicente. D. Bourgal, J. Crawford, P. Drap, C. Lima, P. Nérhot et N. Vincent.

Précisons, au préalable, que la phase de couverture stéréophotogrammétrique avait déjà été largement développée dans les années 1990, à partir de divers sous-marins utilisant selon le cas des appareils semi-métriques ou des chambres métriques, argentiques. Ce fut notamment le cas en 1993 sur l'épave romaine Plage d'Arles 4, par 662 m de fond, puis sur celle du vaisseau La Lune, perdu en 1664 par 88 m de fond, au large de Toulon. Enfin, c'est en 1996 que la méthode fut perfectionnée, en baie de Marseille, sur l'épave romaine Sud-Caveaux 1, par 64 m de fond [Long 1998]. C'est toutefois en 1964 que le sous-marin Asherah, avec le soutien financier de la National Geographic Society, avait inauguré en Turquie, par 35 m de fond, les toutes premières prises de vues stéréoscopiques, sur l'épave byzantine Yassi Ada 2 [Bass 1970 ; Bass, Rosencrantz 1973]. Réalisée aujourd'hui en une seule journée par une équipe bien entraînée, jusqu'à une profondeur qui peut atteindre 6000 m (limite d'intervention du sous-marin Nautille, IFREMER), l'opération consiste d'abord à équiper le site d'un certain nombre d'éléments indispensables au relevé photogrammétrique. Il s'agit d'étalons de longueur pour la mise à l'échelle et de flotteurs pour l'orientation du référentiel, sur la verticale.

Sur l'épave Grand Ribaud F, le choix de la photographie numérique permettait de valider le prises de vues dès la remontée en surface du sous-marin et d'effectuer des mesures de contrôle le jour même, à bord du bateau. Cette couverture était nécessaire, pour mémoriser l'état de l'épave et permettre l'élaboration d'un plan du site et une reconstruction 3D utilisant conjointement les données observées sur le terrain et les hypothèses archéologiques.



### 2.3. Les systèmes de gestion de l'information en archéologie

Depuis plusieurs années les Systèmes d'Informations Géographiques sont devenus des outils quasi courants pour les archéologues<sup>3</sup>

Un grand nombre de recherches est mené dans cette direction, comme en témoigne le travail de l'UISPP qui en 1996 consacra son 13<sup>ème</sup> congrès à ce problème : "Archaeological Applications of GIS", 13<sup>ème</sup> congrès de l'UISPP à Forli, Italie, 1996.

qui voient dans cette technologie l'alliance entre la grande masse d'informations collectée sur le terrain et la représentation graphique support de l'analyse. ([Barceló, 2000], [Brovelli, 2000], [Lianos, Patias, 1999]) Les représentations graphiques des SIG sont le plus souvent issues du domaine cartographique, c'est-à-dire alliant vecteur, image et symbologie dans des outils de visualisation 2D. La culture séculaire de lecture des cartes (voir l'ouvrage de Christian Jacob à ce propos, [Jacob, 1992]) est un atout majeur dans l'utilisation des SIG et probablement un des obstacles à la constitution d'un SIG 3D. En effet, outre l'aspect représentation réaliste, la puissance d'un SIG est aussi liée à la représentation cartographique symbolique des données offrant une expression synthétique de l'analyse des données. [Brovelli, 2000]

Si la représentation 2D suffit à rendre compte du travail archéologique en ce qui concerne une échelle urbaine ou plus grande, appliquée à une période dont les traces en élévation sont inexistantes, il n'en est pas de même quand les études sont menées à l'échelle de l'édifice ou dans le cas présent du navire. Le besoin de représentation 3D est alors primordial et la compréhension globale de l'étude passe par ce type de représentation.

### 2.4. Le projet ARPENTEUR

#### Image<sup>3</sup>

ARPENTEUR (pour ARchitectural PhotogrammEtry Network Tool for EdUcation and Research) est un ensemble d'outils logiciels développés en collaboration avec l'Equipe PAGE à Strasbourg du laboratoire MAP. Ces outils sont basés sur le concept d'utilisation en réseau et s'appuient sur les techniques de communication HTTP et FTP. Des exemples peuvent être consultés sur le site Internet <http://arpenteur.gamsau.archi.fr>.

Les principales justifications du projet sont les suivantes :

1. Comme logiciel pour l'éducation et la recherche, le langage de développement JAVATM fournit un outil et une technologie permettant à des équipes travaillant sur des sites et des systèmes distincts et distants, un moyen commode de travail et d'échange.
2. Comme outil dédié à l'architecture, ARPENTEUR bénéficie de l'expertise des deux équipes dans les domaines de la photogrammétrie rapprochée et de la représentation des

connaissances architecturales.

3. Comme outil dédié à la photogrammétrie, ARPENTEUR est un système simple et doit être classé parmi les systèmes légers de photogrammétrie, légers au sens de sa simplicité d'utilisation et qui ne requiert pas de matériel d'exploitation lourd.

L'intégration de ces objectifs dans un même ensemble s'appuie sur des choix techniques et conceptuels.

Le premier de ces choix consiste à utiliser des images digitales obtenues à l'aide d'appareils de photographie numérique que l'on trouve aujourd'hui dans le commerce et dont certains présentent des caractéristiques suffisantes en ce qui concerne la qualité des images. Ces images numériques offrent également à l'utilisateur des outils de traitement qui automatisent certaines des tâches habituellement réalisées par un opérateur humain. Enfin, elles permettent l'intégration totale de la chaîne de traitement depuis les photographies jusqu'à certains résultats finaux comme la visualisation en 3 dimensions dans des logiciels de CAO-DAO 3D.

Cette intégration est mise à profit pour servir un autre choix, conceptuel, fondé sur l'idée d'un processus guidé par les connaissances relatives au domaine. Concernant l'architecture aussi bien que l'archéologie, il s'agit de permettre à l'expert du domaine d'exploiter ses connaissances pour produire au mieux un résultat conforme à ses vœux. Le résultat peut se présenter sous la forme de documents de relevé, de fichiers dédiés à la visualisation ou en corpus destiné à une base de données. Pour cela, le système fournit à cet expert un ensemble d'outils lui permettant d'exprimer des hypothèses relatives à son champ d'investigation, hypothèses dont l'utilisation conduit à un allègement du processus de mesurage. Parmi celles-ci, citons par exemple, la création d'un corpus représentant les objets présents dans le champ d'investigation.

Comme bénéfice de ces choix, ARPENTEUR apparaît comme un outil développé pour des professionnels de l'architecture ou de l'archéologie avec une intervention réduite de l'expert photogrammètre.

L'Arpenteur utilise les connaissances de l'expert tout au long du traitement photogramétrique, il utilisera donc diverses connaissances afin d'alléger les différentes étapes du processus. Voici rapidement les niveaux de connaissances utilisés en fonction des étapes du procédé photogramétrique.

- Le premier niveau est géométrique. La connaissance que l'on a des objets étudiés est tout d'abord géométrique, souvent les objets manufacturés peuvent s'approximer par une succession de primitives géométriques. L'arpenteur étant un outil de photogrammétrie, nous nous efforcerons donc de prendre en compte la géométrie des objets, géométrie 3D, et d'en calculer une possible projection perspective sur la photo afin d'anticiper le geste de l'archéologue utilisant l'outil. Ces développements fortement axés sur le calcul géométrique

et le traitement d'image sont très prometteurs, ils ont débouché sur le procédé I-Mage (Image processing and Measure Assisted by GEometrical primitive) qui a ouvert les portes aux développements visant à intégrer la photogrammétrie et les techniques de Laser Scanner au sein d'un seul et même outil de relevé [Drap, Grussenmeyer, Curtinot, Seinturier, Gaillard, 2004].

- Le second niveau est encore géométrique avec cependant une composante cognitive importante. Il s'agit d'utiliser la notion de modèle lié aux objets mesurés pour pouvoir compléter un ensemble de mesures. Ces mesures sont incomplètes soit parce que l'objet n'est vu que partiellement, soit parce que l'objet est endommagé lors de la prise de vue. La stratégie de reconstruction de l'objet est déterminée par un système expert qui applique un ensemble de règles faisant partie de la description de l'objet.

- Enfin, le dernier niveau de traitement utilisant les connaissances du domaine est celui de l'analyse et de la présentation des résultats. Un procédé photogrammétrique peut produire une grande quantité de résultats, il convient donc de savoir les organiser, les présenter et les utiliser en les fusionnant à d'autres données. Il s'agit ici d'utiliser les capacités de la photogrammétrie pour faire un pas vers un système d'information patrimonial, liant les données géo référencées à un ensemble de données préexistantes. Les modèles 3D générés servent ici d'interface vers des bases de données qui peuvent être mises à jour indépendamment du relevé photogrammétrique. La connaissance du domaine est ici utilisée dans un processus de contrôle de cohérence des données (cohérence spatiale par exemple) et par l'application de règles de fusion et de révision des informations tout au long des fouilles archéologiques.

#### Formats des données

Depuis 2002, les données utilisées et générées par l'arpenteur sont stockées sous forme de fichiers XML. Le langage XML, qui repose sur le principe de marquage, permet de dissocier le contenu de sa description. Ce qui assure une bonne structure à l'information et facilite les échanges et partages de données.

Ainsi, il est possible par exemple d'importer un projet élaboré sous PHOTOMODELERTM et d'en retirer toute l'information nécessaire grâce à une traduction au format XML. On peut donc envisager d'exploiter sur arpenteur un chantier multi-images mis en place sous PHOTOMODELERTM

### **2.5. L'élaboration d'un corpus spécifique**

Le système de gestion documentaire proposé dans ce travail repose sur l'hypothèse de l'existence d'un modèle théorique des objets architecturaux étudiés. Nous pouvons ainsi proposer un modèle théorique depuis les amphores jusqu'aux éléments constitutifs du navire.

Ce modèle a pour vocation de décrire d'une part une typologie d'objet, travail qui fut entrepris par exemple dès 1899 par Heinrich Dressel pour la première classification des amphores, et d'autre part un ensemble de relations décrivant le comportement et l'agencement de ces objets entre eux.

### 2.5.1. Typologie des amphores :

Toutes les amphores du chargement, à bord de l'épave, sont d'origine étrusque. Simple emballage perdu fabriqué en série par une main d'œuvre servile, l'amphore commerciale était, dans l'Antiquité, indiscutablement liée au transport maritime et pouvait se retrouver à des milliers d'exemplaires sur un même navire. Si c'est particulièrement le cas pour l'époque romaine, on ne connaissait pas jusque-là, pour la période archaïque, avant le Grand-Ribaud F, de navire aussi lourdement chargé d'amphores. Il faut préciser, de manière générale, que les amphores que l'on retrouve sur tout le pourtour de la Méditerranée, ont servi à conditionner en très grande quantité pour un coût modeste les denrées alimentaires de base. C'est le cas du vin, que l'on retrouve notamment dans nos amphores étrusques, mais d'autres produits pouvaient être conservés dans ces récipients en terre cuite : huile, olives, viandes, conserves de poissons, sauces, saumures... Produites pour un seul voyage, les amphores apportent en conséquence une documentation exceptionnelle et donnent l'occasion aux archéologues, amphorologues et historiens, de saisir à travers elles les structures, l'organisation et les pulsations mêmes du commerce et de l'économie antiques.

#### Image4

Figure 3. Amphore phénicienne d'occident de type P. Cintas 268. A la fin du VIII<sup>ème</sup> siècle et au VII<sup>ème</sup> siècle avant J.-C., les amphores les plus anciennes de ce groupe sont probablement phéniciennes, tandis que les plus récentes sont étrusques (d'après [Gras 1985], p. 295, fig. 40).

Au VII<sup>ème</sup> siècle avant J.-C., les premières amphores étrusques connues, en forme d'obus, furent vraisemblablement inspirées de certaines productions phéniciennes occidentales qui font leur apparition en Etrurie dès les dernières années du VIII<sup>ème</sup> siècle. Sur ce point, M. Gras a mis en exergue le type 268 de P. Cintas, qu'il faut sans doute ranger parmi leurs prototypes. Généralement massives, pansues et dépourvues de col, les amphores étrusques sont munies d'une lèvre ou d'un bord en bourrelet et d'anses à profil arrondi. Si F. Benoit, en 1956, identifia le premier ce type d'amphores sur l'épave de la Love, à Antibes, les divers types qui caractérisent cette longue production ont ensuite été individualisés par F. et M. Py, en 1974, dans une étude sur les importations en Vaunage et à Villevielle (Gard). Onze ans plus tard, M. Gras et M. Slaska, complétèrent cette classification en proposant une typologie des amphores d'Etrurie méridionale. Entre ces deux dates, d'autres chercheurs ont tenté à

leur tour d'ordonner les productions étrusques, notamment B. Bouloumié (1980), M. Carduner (1981), G. Marchand, (1982), tandis que plus récemment J.-C. Sourisseau (1997) dressait un bilan synthétique des divers travaux.

Au total, deux séries principales d'amphores étrusques peuvent être isolées : les amphores à fond plat (forme 1-2 et 5) et celles à fond pointu ou bombé, puis taillé, comme sur l'épave (formes 3A, 3B, 4 et 4A). Une bonne partie des formes à fond plat peut être attribuée à la région de Vulci, bien que certaines d'entre elles puissent également provenir de Campanie. Les amphores à fond pointu et bombé, en particulier les formes 3A et 3B, caractéristiques du VI<sup>ème</sup> siècle avant J.-C. ont sans doute été produites simultanément dans plusieurs centres bien distincts. Une partie d'entre elles est issue des ateliers de la région de Caere (Cerveteri), alors qu'un autre groupe important provient d'un centre de production encore mal déterminé, peut-être situé dans la vallée de la Fiora, au nord de Vulci.

Pour la période qui nous intéresse, soit la fin du VI<sup>ème</sup> siècle et le début du V<sup>ème</sup> siècle, les productions à fond pointu (formes 4) semblent bien constituer pour l'essentiel l'évolution des productions de la région de Caere. Celles empilées dans la cale de l'épave Grand Ribaud F (type Py 4, ou encore groupe EMD de M. Gras) ([Py M. et F., 1974]), présentent une forme pansue avec un bord en amande collé directement en haut de la panse, qui ne laisse pas de place au col. La base de la lèvre est parfois soulignée d'une strie bien marquée, les anses de section ronde sont massives, le fond en pointe aplatie est « taillé » selon l'expression consacrée. Les quelques quatre cents exemplaires récupérés à ce jour sur l'épave attestent d'une production très standardisée qui provient sans doute du même atelier. Les observations détaillées de la pâte, le plus souvent grise ou rose en fracture, avec une âme grise ou noire ([Long, Drap, Gantès, Rival 2002] page 23), mettent en évidence une fabrication homogène qui se rattache aux types 1 et 6 du groupe 2 de J.-C. Sourisseau, ce qui confirme une origine céretaine ([Sourisseau, 1997] page 53). La couleur varie à l'extérieur du gris au rose, avec de nombreux grains de mica et des nodules oranges. Si cette forme paraît relativement bien normalisée à bord, elle présente néanmoins des variations de capacité qui individualisent plusieurs groupes. L'examen statistique effectué par A. Durand (Map-Gamsau) sur un grand nombre d'individus nuance nos premières estimations, publiées en 2002 ([Long, Drap, Gantès, Rival 2002] page 23), Le groupe principal est compris entre 29 et 33 litres, avec un pic autour de 30 litres. Un deuxième groupe oscille entre 26 et 28 litres tandis qu'aux extrémités se trouvent d'un côté quelques amphores ne dépassant pas 25 litres et de l'autre des conteneurs volumineux compris entre 35 et 37 litres. La plupart des bouchons de liège, collés à la poix, ont été retrouvés à l'intérieur des récipients, sous l'effet de la pression. Des restes de sarments de vigne et les traces d'usure par frottement, observées dans la terre cuite, attestent qu'elles étaient calées avec du feuillage et arrimées entre elles par des liens.

Du point de vue chronologique, les amphores Py 4 apparaissent entre 525 et 500 sur les sites de consommation de l'Hérault et du Gard où elles sont les plus nombreuses ([Py M. et F.,

1974]). A Marseille, J.-C. Sourisseau note leur arrivée dès les premières années du Ve siècle ([Sourisseau, 1997], page 52). Cette forme dont la présence est encore très forte dans le premier quart du Ve siècle, va décroître rapidement et disparaîtra vers 425, remplacée par le type 4A, à lèvre en bandeau. Largement diffusée entre la Campanie et la Catalogne, cette amphore est attestée sur tout le littoral gaulois avec une concentration particulière, nous l'avons vu, en Languedoc oriental, dans la zone d'influence de Lattes<sup>4</sup>

M. Py, A. M. Adroher Auroux, C. Sanchez, Corpus des céramiques de l'Âge du fer de Lattes (fouilles 1963-1999), DicoCer 2, T1, Lattara 14, Lattes, 2001, p. 24-25.

. Un exemplaire utilisé comme objet de bord sur l'épave massaliète Pointe Lequin 1B est daté du deuxième quart du Ve siècle [Long 1990].

Lors du sondage effectué sur l'épave en 2001, une amphore recueillie à même le bois était encore obturée, mais l'eau de mer s'était substituée au contenu par des micro fissures. Elle présentait sur la panse une marque peinte à la résine qui s'apparente à une inscription étrusque.

Lors de la mission 2002, le sondage profond implanté à l'aide du ventilateur blaster à l'arrière du navire, au départ de l'étambot, laissait apparaître la fin du chargement. Une trentaine d'amphores Py 4 entières ont été remontées de ce secteur. Le tamisage de ces récipients, en surface, par J. Crawford, a livré des pépins de raisin et de nouveaux fragments de sarments de vigne utilisés pour caler les amphores ([Long, Drap, Gantès, Rival 2002] page 23),

La forme du sondage et les mauvaises conditions de travail à cette profondeur ne facilitaient pas le comptage des couches. Les premières restitutions photogrammétriques de la tranchée opérée jusqu'au bois en 2001, à l'ouest du site, laissent envisager, nous le verrons, l'existence de six couches d'amphores superposées. Ce qui, compte tenu des dimensions du navire, incite à penser que l'épave renfermait au moins un millier d'amphores Py 4, soit une charge de l'ordre d'une quarantaine de tonnes.

### 2.5.1. Des relations liant les objets

#### Examen du cas d'étude

Après un examen attentif du mobilier archéologique issu de l'épave, nous avons observé des traces d'usure très nettes sur les anses, sur la lèvre et sur la panse de certaines amphores. Ces traces de frottement confirment qu'une partie au moins des récipients était solidement arrimés par des liens d'environ 6 à 7 mm qui ont entamé l'argile profondément. Du coup, des vérifications faites sur d'autres amphores étrusques recensées dans les dépôts du DRASSM ont mis en évidence des marques similaires qui étaient jusque-là passées inaperçues. Sur les récipients de l'épave, certaines de ces traces d'usure partent de l'anse (très entamée en

profondeur) et se poursuivent plus bas sur la panse, indiquant que les amphores du haut étaient parfois attachées à celles de la couche inférieure. Cette remarque nous porte à croire que le chargement était arrimé comme un bloc unitaire et homogène et échappait ainsi au commerce de redistribution d'un port à l'autre que sous-entend l'emporion grec. Il rappelle plus vraisemblablement le commerce étrusque sur de longues distances, de cité à cité, qui était régi par des traités et des alliances, tel que l'illustre pour le VI<sup>ème</sup> siècle avant J.-C. l'épave de la Love à Antibes.

On signalera en outre sur le Grand Ribaud F qu'un certain nombre d'amphores présentent un orifice ou un sillon plus ou moins grand, parfois allongé, situé sur le milieu de la panse ou à 13 ou 14 cm en dessous de son diamètre maximal. Cette détérioration se situe très exactement au point de contact et donc de frottement avec la lèvre des amphores inférieures.

Image5

Image6

Image7

Figure 4. A gauche, traces d'usure sur les amphores ; milieu, réalisation expérimentale de l'empilement des amphores. Simulation dans les locaux du DRASSM sur des amphores retirées du site. A droite reconstitution du chargement au Musée d'Histoire de Marseille.

Cette constatation qui se vérifie sur les images du sondage où les couches sont encore bien agencées, a pu être mise parfaitement en évidence par ailleurs lors de l'empilement expérimental. Ces traces d'usure nous servaient en même temps de point de calage.

Au-delà de l'intérêt archéologique de telle reconstitution, avec des moyens de fortune ou de réelles visées muséographiques, ces tentatives de reconstruction du chargement mettent en évidence les véritables besoins des archéologues : l'obtention de maquettes tridimensionnelles pour mettre en scènes des hypothèses archéologiques. L'obtention de modèles 3D fidèles à chaque amphore, sa position et son orientation dans le site lors de sa découverte a été notre objectif principal lors de ces diverses campagnes.

Mais nous arrivons ici au terme de la première partie. Nous avons abordé les problèmes posés à l'archéologue désireux de conserver une copie fidèle du site qu'il étudie et qu'il détruit dans le même temps. Nous verrons dans la suite de ce travail comment la photogrammétrie, adaptée au milieu marin, peut générer des représentations tridimensionnelles fidèles qui vont se substituer au gisement et permettre à l'archéologue de poursuivre ses observations dans un milieu créé au plus près du terrain, mais qui n'impose plus d'immersion dangereuse.

### 3. Photogrammétrie

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.

### 3.1. Adaptation au milieu sous-marin

Adaptation au milieu sous-marin

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

#### 3.1.2. Calibration

Image8

Image9

Figure 5. 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.

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 photogrammétrie multimédia : 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-dessous [Kwon, 1998].

#### Image10

Figure 6. Coordonnées des points réfractés et non réfractés répartis sur trois cadres. [Kwon, 1998].

Dans le cadre de ce projet, un des facteurs incontournables est de donner aux archéologues un outil de photogrammétrie 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 5 la grille de calibration de Photomodeler V4, mise en place par un plongeur, sous l'appareil de prise de vue, solidaire du sous-marin.

### 3.1.3. Orientations

#### Image11

#### Image12

Figure 7. 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. (Photo : F. Bassemayousse)

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 20x10 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 14mm). En revanche, avec un plongeur 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.

## **3.2. Le relevé des amphores**

### **3.2.1. 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.

Image13

Image14

Image15

Figure 8. 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.

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.

### 3.2.2. 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 :

1. 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 PY4, 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) cette épave. La spécificité de la mesure de ces classes tient essentiellement aux valeurs par défaut qui diffèrent, la forme générale restant identique.
2. 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].

#### Image16

Figure 9. 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.

La mesure photogrammétrique est supportée par quelques points stratégiques de l'amphore (pointillé sur le schéma Figure 8, 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 graphiques (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.

### **3.2.3. 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.

#### 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 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.

Figure 10. Des sources de données à la représentation complète de l'objet: Fonctionnement du Système Expert. (Schéma Julien Seinturer)

### 3.2.4. 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).

Figure 11. Représentation du site après les campagnes 2000 et 2001. Rendu des amphores avec MicroStation.

Figure 12. Sur la base des relevés des campagnes 2000, 2001 et 2002, une hypothèse de positionnement du navire

Image17

Figure 13. Vue générale du site et des différents sondages effectués (2000-2002). Représentation Microstation.

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 échafauder 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 m<sup>2</sup>. 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 10, en haut, complétée par la figure 12, 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 m<sup>2</sup> en surface et à 60 ou 50 m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>, ne couvrent en gros qu'un tiers du gisement.

### 3.3. 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.

#### 4. 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]).

### Image18

Figure 14. Orthophoto géoréférencée et superposition des artefacts mesurés. Interface SVG d'accès aux données archéologiques enregistrées dans les différents fichiers XML.

Comme on peut le voir sur la Figure 1, l'ensemble des données mesurées est formalisé en XML et les interfaces d'accès à ces données utilisent des 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 14 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.

## 5. Développements en cours et en projet

### 5.1. 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]).

#### 5.1.1. 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.

#### 5.1.2. 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.

### **5.1.3. 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.

### **5.1.4. 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 :

1. 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.
2. 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.

### 5.1.5. 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.

### 5.1.6. 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.

## 5.2. 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 :

1. 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 polynômes [Papini, 2001].

2. 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.

## 6. 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 récipients 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.

## 7. Références bibliographiques

### 7.1. Partie A

[Barceló, 2000] Juan A. Barceló, Visualizing what might be. An introduction to virtual reality techniques in archaeology. VIRTUAL REALITY IN ARCHAEOLOGY, Edited by Juan A. Barceló, Donald Sanders, Maurizio Forte. Published by Archéopress PO Box 920 Oxford OX27YH, 2000.

[Bass, 1970] : Georges F. Bass, « Archaeology under Water », a Pelican Book, Harmondsworth, 1970, 183

[Bass, Rosencrantz 1973] : Georges F. Bass, Donald Rosencrantz « L'utilisation des submersibles pour les recherches et la cartographie photogrammétrique sous-marine. In : L'archéologie subaquatique, une discipline naissante », Paris, Unesco, 1973, p. 285-298.

[BonFigli, Guidazzoli, 2000] Maria Elena BonFigli, Antonella Guidazzoli, A www virtual museum for improving the knowledge of the history of a city VIRTUAL REALITY IN ARCHAEOLOGY, Edited by Juan A. Barceló, Donald Sanders, Maurizio Forte. Published by Archéopress PO Box 920 Oxford OX27YH, 2000.

[Brovelli, 2000] Maria Antonia Brovelli, Archeogis: an interoperable model for archaeological data, 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-B commission IV, pp 140, 148.

[Drap, Grussenmeyer, Curtinot, Seinturier, Gaillard, 2004] P. Drap, P. Grussenmeyer, P.Y. Curtinot, J. Seinturier, G. Gaillard, «Presentation of the web based ARPENTEUR tools: towards a Photogrammetry based Heritage Information System. », ISPRS XXth CONGRESS, Turkey, Istanbul, 12-23 July 2004

[Gras, 1985] Michel GRAS : "Aspects de l'économie maritime étrusque".Ktéma.10,1985.

[Hesnard, 1988] A. Hesnard et al. L'épave romaine Grand Ribaud D (Hyères, Var). Archaeonautica 8 (1988) 55 planches.

[Jacob, 1992] Christian Jacob, L'empire des cartes. Approche théorique de la cartographie à travers l'histoire, Bibliothèque Albin Michel, Histoire. Paris, 1992. ISBN 2-226-06083-9.

[Lianos, Patias, 1999] Nikolaos Lianos, Petros Patias, A virtual underwater archaeological park, ISPRSS WGV/5 and WGV/2 joint workshop, Photogrammetric measurement, object modelling and documentation in architecture and industry. Thessaloniki, Greece, 1999. ISBN

960-431-535-8. pp 259, 265.

[Long, 1988] Luc Long The Ancient wreck of Carry-le-Rouet : evidence of sea transport of stone in the 2nd or 1st century B.C. in ; Archeology in solution, proceedings of the Seventeenth annual conference on underwater archaeology, ed. John W. Forster, Sheli O. Smith, Sacramento, 1988, p. 22-27.

[Long, 1990] Luc Long, Amphores massaliètes, Objets isolés et gisements sous-marins du littoral français méditerranéen, in Les amphores grecques de Marseille, Etudes Massaliètes, 2, 1990;

[Long, 1995] Luc Long. « Les archéologues au bras de fer. Nouvelle approche de l'archéologie en eau profonde. In : Protection du Patrimoine Archéologique Sous-Marin en Méditerranée. 100 sites d'intérêt commun méditerranéen ». Documents techniques V, AMPHI, Marseille, 1995, p. 14-46.

[Long, 1998] Luc Long. « L'archéologie sous-marine à grande profondeur : fiction ou réalité. » In : Archeologia Subacquea, Come opera l'archeologo sott'acqua, Storie dalle acque, VIII ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia, Certosa di Pontignano, Siena, 9-15 dicembre 1996, Siena, 1998, 341-379.

[Long, Gantès, Drap 2000] Luc Long, Louis-François Gantes, Pierre Drap. « Premiers résultats archéologiques sur l'épave Grand Ribaud F (Giens, Var). Quelques éléments nouveaux sur le commerce étrusque en Gaule, vers 500 avant J.-C. » Dans : Cahiers d'Archéologie Subaquatique, 14, 2002, p. 5-40.

[Long, Drap, Gantès, Rival 2002] Luc Long, Pierre Drap, Louis-François Gantes, Michel Rival. « Presqu'île de Giens, l'épave étrusque Grand Ribaud F. » Bilan Scientifique du DRASSM, 2001 (2002), p. 74-77.

[Py, 1972] Michel Py. Les disques perlés en bronze du Languedoc oriental, in : RSL, 38, 1972, 1, p. 27-61.

[Py M. et F., 1974] François et Michel Py Les amphores étrusques de Vaunage et de Villevielle (Gard), in : MEFRA 86, 1974, 1.

[Py, 1985] Michel Py, Les amphores étrusques de Gaule Méridionale, in : Il commercio etrusco arcaico, Atti di Roma, 5-7 dicembre 1983, 1985, p.73-94.

[Sourisseau, 1997] Sourisseau J.-Chr., Recherches sur les amphores de Provence et de la Basse Vallée du Rhône aux époques archaïque et Classique (fin VII<sup>e</sup>-début IV<sup>e</sup> s. av. J.-C.), thèse de doctorat, Aix-en-Provence, 1997.

## **7.2. Partie B**



[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) 24-25 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 - 15 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 hystory o 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>