

numéro

21

*Revue d'***HISTOIRE**  
**MARITIME**

Histoire maritime  
Outre-mer  
Relations internationales

*Les nouveaux enjeux  
de l'archéologie sous-marine*

**Tiré à part**

**I-2. Vincent Dumas et al. – 979-10-231-1260-3**





*Revue d'***HISTOIRE**  
**MARITIME**

n° 21 • 2015/2

Les PUPS, désormais SUP, sont un service général  
de la faculté des Lettres de Sorbonne Université.

© Presses de l'université Paris-Sorbonne, 2015

© Sorbonne Université Presses, 2020

ISBN PAPIER : 979-10-231-0502-5

ISBN PDF COMPLET : 979-10-231-1255-9

TIRÉS À PART EN PDF :

- I-1. Marie-Yvane Daire *et al.* – 979-10-231-1256-6
  - I-1. Michel L'Hour – 979-10-231-1257-3
  - I-1. Christophe Cérino – 979-10-231-1258-0
  - I-1. Blair Atcheson *et al.* – 979-10-231-1259-7
  - I-2. Vincent Dumas *et al.* – 979-10-231-1260-3
    - I-2. Pierre Poveda – 979-10-231-1261-0
    - I-2. Alexandra Grille – 979-10-231-1262-7
    - I-3. Emmanuel Nantet – 979-10-231-1263-4
    - I-3. Gaëlle Dieulefet – 979-10-231-1264-1
    - I-3. Jerzy Gawronski – 979-10-231-1265-8
    - I. Gérard Le Bouëdec – 979-10-231-1266-5
      - I. Glossaire – 979-10-231-1267-2
      - II. Antoine Rivault – 979-10-231-1268-9
      - II. Claire Boër – 979-10-231-1269-6
      - II. Olivier Lopez – 979-10-231-1270-2
  - II. Irina Tsitocitch-Kozlova – 979-10-231-1271-9
  - II. Pierre Caillousse – 979-10-231-1272-6
  - II. Raphaël Ramos – 979-10-231-1273-3
  - II. Jean-Baptiste Blain – 979-10-231-1274-0
- Varia.* Laura Le Goff, Catherine Dupont – 979-10-231-1275-7
  - Varia.* Pierre Le Bot – 979-10-231-1276-4
  - Varia.* Guillemette Crouzet – 979-10-231-1277-1
  - Varia.* Jean-Marie Kowalski – 979-10-231-1278-8
- Chronique, position de thèse – 979-10-231-1279-5
- Comptes rendus – 979-10-231-1280-1

Maquette et réalisation : Compo Meca Publishing (64990 Mouguerre)

d'après le graphisme de Patrick Van Dieren

Versions PDF : 3d2s (Paris)

SUP

Maison de la Recherche

Sorbonne Université

28, rue Serpente

75006 Paris

tél. : (33)(0)1 53 10 57 60

fax : (33)(0)1 53 10 57 66

sup@sorbonne-universite.fr  
<https://sup.sorbonne-universite.fr>

## SOMMAIRE

Avant-propos .....7

### Éditorial

Jean-Pierre Poussou .....9

### I. DOSSIER

## LES NOUVEAUX ENJEUX DE L'ARCHÉOLOGIE SOUS-MARINE

Les nouveaux enjeux de l'archéologie sous-marine

Christophe Cérino, Michel L'Hour, Éric Rieth ..... 15

### LES NOUVELLES PROBLÉMATIQUES DE LA RECHERCHE

Les apports de l'archéologie subaquatique au projet européen « *Arch-Manche* »

Marie-Yvane Daire, Catherine Dupont, Loïc Langouët, Laetitia Le Ru, Grégor Marchand,  
Chloé Martin, Garry Momber, Pau Olmos, Julie Satchell, Lauren Tidbury ..... 21

De la mer à la *Lune* : la longue marche des archéologues sous-marins français vers  
les abysses

Michel L'Hour .....45

Les épaves de la Bataille de l'Atlantique au Pays de Lorient : enjeux scientifiques,  
patrimoniaux et de valorisation

Christophe Cérino .....67

Retour en Normandie : prospections archéologiques de l'*US Navy* sur la flotte  
immergée de l'Opération *Neptune*

Blair Atcheson, Robert Neyland, Alexis Catsambis .....85

### LES NOUVELLES TECHNOLOGIES AU SERVICE DE LA RECHERCHE SUBAQUATIQUE

Application de la photogrammétrie en archéologie navale

Vincent Dumas, Philippe Groscaux †, Giulia Boetto ..... 127

Méthode de restitution des navires antiques : nouveaux outils et nouvelles analyses des restitutions en archéologie navale Pierre Poveda .....	157
---	-----

L'épave de l'Aber Wrac'h 1 : entre tradition (maquette) et innovation (3D) Alexandra Grille .....	181
--	-----

#### LES NOUVEAUX ENJEUX DE VALORISATION DE LA RECHERCHE

Le gouvernail antique : bilan et perspectives Emmanuel Nantet .....	197
--	-----

Échanges maritimes et culture matérielle : une approche par l'analyse des mouillages et des céramiques, xv <sup>e</sup> -xviii <sup>e</sup> siècles Gaëlle Dieulefet .....	207
---	-----

4 Navires et villes en archéologie maritime : le navire de la <i>VOC Amsterdam</i> et l'archéologie biographique de la ville d'Amsterdam au xviii <sup>e</sup> siècle Jerzy Gawronski .....	231
--	-----

#### CONCLUSIONS

Synthèse de la table ronde interdisciplinaire du 15 avril 2014 : « Archéologie sous-marine, histoire et patrimoine maritime : les nouveaux enjeux de la recherche » Gérard Le Bouëdec .....	263
--	-----

Glossaire Éric Rieth .....	267
-------------------------------	-----

#### II

### PRÉSENTATION DE LEURS RECHERCHES PAR LES DOCTORANTS EN HISTOIRE MARITIME (LORIENT, JUIN 2014)

Le duc d'Étampes et la Bretagne : être gouverneur d'une province maritime au xv <sup>e</sup> siècle (1543-1565) Antoine Rivault .....	281
--	-----

Entre terre et mer : cadre de vie, culture matérielle et destins de marins provençaux au xviii <sup>e</sup> siècle Claire Boër .....	293
---	-----

Travailler chez l'autre, vivre avec ? En Barbarie avec les employés de la Compagnie royale d'Afrique au xviii <sup>e</sup> siècle Olivier Lopez .....	307
--	-----

La présence russe dans le Pacifique Sud sous le règne du tsar Alexandre I <sup>er</sup> (1801-1825) Irina Tsitovitch-Kozlova .....	319
La transformation des littoraux de la pointe du Médoc de la fin du xvi <sup>e</sup> au milieu du xix <sup>e</sup> siècle: problématique, sources et méthodes d'analyse Pierre Caillosse .....	329
La Marine américaine et la réorganisation du renseignement au lendemain de la Seconde Guerre mondiale Raphaël Ramos .....	343
Les <i>U-Boot-Bunker</i> construits dans les villes portuaires françaises de la côte atlantique: des lieux aux multiples fonctionnalités (1940-2010) Jean-Baptiste Blain .....	357

III  
*VARIA*

L'exploitation des ressources marines par les populations médiévales: un premier bilan des coquillages découverts en contexte archéologique entre Manche et Garonne Laura Le Goff, Catherine Dupont .....	367
« Beaucoup de mal et peu d'honneur » : la Marine royale en guerre contre Tunis et Tripoli (1727-1729) Pierre Le Bot .....	389
« Boutres tricolores, boutres de discorde » : Britanniques et Français en Oman et dans le nord de l'océan Indien à la fin du xix <sup>e</sup> siècle Guillemette Crouzet .....	407
D'une rive de la rade de Brest à l'autre, une nouvelle École navale pour une nouvelle Marine Jean-Marie Kowalski .....	435

IV  
CHRONIQUE

Jean Boudriot (1921-2015) .....	463
Paul Butel (1931-2015) .....	465
Entre tradition et innovation: itinéraire d'un marin, Edmond Paris (1806-1893) Position de thèse de Géraldine Barron-Fortier .....	471

v  
COMPTES RENDUS

Jean-François Henry, <i>L'île d'Yeu dans la Grande Guerre. Chronique de la vie quotidienne</i> .....	477
Alain Blondy (avec la collaboration de Jean Bérenger), <i>Documents consulaires : Lettres reçues par le chargé d'affaires du Roi à Malte au XVIII<sup>e</sup> siècle</i> .....	479
Christian Borde et Christian Pfister (dir.), <i>Histoire navale, histoire maritime. Mélanges offerts à Patrick Villiers</i> .....	481
Jean de Préneuf, Éric Grove et Andrew Lambert (dir.), <i>Entre terre et mer. L'occupation militaire des espaces maritimes et littoraux</i> .....	484



## AVANT-PROPOS

L'ampleur de ce numéro 21, son caractère largement technique et en même temps innovant sont le fruit de la collaboration des partenaires habituels de notre revue – la Fédération d'histoire et d'archéologie maritimes de l'université Paris-Sorbonne, l'UMR CNRS 6258 CERHIO (Université de Bretagne Sud) et le GIS d'histoire maritime –, avec le Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (DRASSM) du ministère de la Culture. Le soutien de celui-ci, qui est venu s'ajouter à nos financements ordinaires, a permis de doter ce numéro 21 d'une illustration en couleur exceptionnellement riche. Nous lui exprimons notre très vive gratitude et nous nous réjouissons de cette collaboration dont le but est le bien commun de nos deux très proches disciplines, l'histoire maritime et l'archéologie sous-marine. Nous tenons aussi à remercier nos collègues Philippe Jarnoux et Pierrick Pourchasse (EA CRBC) pour avoir pris en charge la coordination des échanges avec le Bureau de traduction universitaire de l'université de Brest qui a assuré les conversions de l'anglais vers le français.



## ÉDITORIAL

*Jean-Pierre Poussou*

Le numéro 21 de la *Revue d'histoire maritime* constitue l'un des plus fournis, par son volume, que notre revue ait publié depuis sa création. Cela tient tout d'abord à l'ampleur du dossier principal : « Les nouveaux enjeux de l'archéologie sous-marine », dû à l'initiative de Christophe Cérino, dossier qu'il a rassemblé en collaboration avec Michel L'Hour et Éric Rieth. Il s'agissait de répondre à un double enjeu : d'une part, faire mieux connaître aux historiens du maritime les considérables progrès et les importants résultats obtenus depuis une génération par l'archéologie sous-marine, champ de recherche en plein développement ; d'autre part, rapprocher deux démarches disciplinaires : celles de l'histoire et de l'archéologie sous-marine, voisines mais relativement peu liées, alors que les plans de rencontre sont plus nombreux qu'on ne le croit, comme le montre, par exemple, dans ce numéro 21, le remarquable texte de Jerzy Gawronski. C'était d'autant plus nécessaire que les manières d'explorer le maritime et son histoire, les sources utilisées, plus encore les manières d'écrire des uns et des autres sont dissemblables. Il est certain, en particulier, que le vocabulaire des archéologues sous-marins est peu familier des historiens, tant il est fourni en termes particuliers et techniques, au point qu'il nous a fallu rajouter au dossier un volumineux glossaire qui devrait rendre de grands services aux historiens du maritime, ainsi qu'à tous ceux qui s'intéressent à l'archéologie sous-marine, et pour lequel il faut fortement remercier Éric Rieth. Nos lecteurs seront donc aux prises avec des textes d'une technicité inhabituelle pour eux, mais cela en valait la peine, et l'on verra que la démarche impulsée par deux colloques successifs, tenus à Lorient en 2009 et 2014, et dont ce numéro est l'aboutissement, a tenu toutes ses promesses.

Trois directions ont été choisies. Au départ, nous avons les « nouvelles problématiques de la recherche archéologique sous-marine » dont la première caractéristique est de souligner l'originalité de ses buts : ici analyse des changements côtiers (Marie-Yvane Daire et son équipe), puis prospection et étude des épaves à grande profondeur (Michel L'Hour, Christophe Cérino,

Robert Neyland et collaborateurs<sup>1</sup>). L'analyse grâce à l'archéologie subaquatique des changements côtiers a des perspectives pluridisciplinaires riches d'avenir puisque, dans le cadre du projet européen *Arch-Manche*, à la fois elle fait connaître les effets des changements climatiques survenus sur nos côtes sur le temps long de l'Holocène, et elle aboutit à l'étude de sites archéologiques aujourd'hui submergés, les résultats étant spectaculaires pour le Solent et pour la presqu'île de Quiberon. Ainsi revivent les paysages mésolithiques côtiers submergés (Marie-Yvane Daire *et al.*).

10

Ce sont aux épaves maritimes, conservées à de grande profondeur, que sont consacrés les trois autres textes inclus dans cette première partie du dossier. Tout en axant son propos sur le chantier-laboratoire du vaisseau à deux ponts, la *Lune*, « ce précieux témoin de la première Marine de Louis XIV » englouti depuis 1664 en rade de Toulon, à 91 mètres de profondeur, Michel L'Hour saisit cette occasion pour nous retracer les étapes de la conquête des abysses par les archéologues sous-marins français, ce qui fait de cet article un texte de référence historiographique très précieux. Mais, l'une des avancées récentes a été l'intérêt porté aux épaves métalliques contemporaines, ce qui nous situe dans un autre domaine que celui de la *Lune*, et ce qui soulève d'autres problèmes et difficultés qu'exposent les textes signés par Christophe Cérino et Robert Neyland. Les démarches et moyens d'investigation ne sont plus du tout les mêmes : il faut posséder une très bonne connaissance des matériels et armements utilisés pendant la Seconde Guerre mondiale, mais aussi des opérations de guerre ; il est nécessaire, par ailleurs, de disposer de gros moyens financiers et matériels vu le nombre des bunkers et autres édifices liés au mur de l'Atlantique ou à la mise en défense des installations allemandes, et étant donné également l'étendue du champ à couvrir dans le cadre de l'opération *Overlord*. Pour celle-ci, le rôle du *Naval History and Heritage Command* a donc été essentiel. Les résultats étonneront, mais il nous faut également prendre en considération que cette sauvegarde du patrimoine sous-marin hérité des combats de la fin de la guerre de 1940-1945 peut déboucher sur des conséquences historiques considérables non seulement grâce à la publication des recherches qui y sont liées, mais aussi parce que, comme cela s'est passé au pays de Lorient – et Christophe Cérino y a pris une grande part –, le débouché de ces travaux est la création d'espaces muséographiques.

Il a été beaucoup question dans ces premiers textes des technologies, notamment récentes, et de leur si fécond apport aux recherches sous-marines. C'est à les étudier plus en détail que nous invite la deuxième partie du dossier.

---

1 Ce sont Blair Atcheson et Alexis Catsambis. Ce n'est que par commodité que nous ne citons dans cet éditorial que Robert Neyland car c'est avec lui que nous avons été en contact.

La photogrammétrie numérique en est un élément essentiel car elle permet d'établir « une documentation graphique normalisée et objective devant servir de support à l'élaboration des différentes hypothèses d'une recherche mise en œuvre en Croatie (Vincent Dumas, le regretté Philippe Groscaux, et Giulia Boetto). Très technique, l'article montre à quel point « l'utilisation de la photogrammétrie numérique et des autres procédés d'acquisition 3D » est « une évolution majeure des méthodes de relevé », le but étant aussi d'aboutir à la reconstitution des navires ou marques, ce à quoi est consacré le texte suivant de Pierre Poveda, qui fait partie de la même unité CNRS que les précédents auteurs. P. Poveda s'est attaché à la « restitution des navires antiques par de nouveaux outils et nouvelles analyses ». Le but de ces travaux est à la fois de reconstituer ces navires mais aussi, grâce à cette démarche, d'atteindre la « quantité fabuleuse de savoirs », qu'ils représentent, sans oublier les cargaisons. Depuis une quinzaine d'années, les recherches ont pu aller beaucoup plus loin grâce à « la place de plus en plus importante prise par l'outil informatique ». C'est justement, cette fois de manière concrète, à une reconstitution que s'est attaquée Alexandra Grille à propos de l'épave de l'*Aber Wrac'h I* – 18 m de long sur 5 de large –, découverte en 1985 ; le modèle numérique a permis « d'analyser la séquence de construction après la reconstitution des pièces architecturales individuelles, et de réaliser les calculs des propriétés hydrostatiques ».

La troisième partie du dossier s'attache, par trois exemples, à montrer ce que peut apporter la valorisation de la recherche sous-marine. Ce sont « les nouveaux enjeux » de cette valorisation. Dans un cas, avec Emmanuel Nantet, le but a été de reprendre la célèbre question du gouvernail antique. Notre auteur montre qu'on ne peut pas le considérer de manière simplement négative, en le définissant comme un instrument très inférieur au gouvernail d'étambot, comme on l'a trop fait : les fouilles sous-marines amènent à la conclusion qu'il n'était nullement figé et surtout qu'on ne peut comprendre son fonctionnement et apprécier celui-ci que dans le cadre général du navire dont il n'est qu'un élément. Pour sa part, Gaëlle Dieulefet a étudié des sites de mouillage méditerranéens des xv<sup>e</sup>-xviii<sup>e</sup> siècles car ils sont « les témoins des mouvements maritimes et des navires de passage », et sont plus particulièrement riches en céramiques. Non seulement les productions sont variées mais en outre elles permettent de découvrir, en plus des courants d'échanges, des pratiques culinaires et de préparation des aliments, ce qui débouche sur des approches très nouvelles. Encore plus spectaculaire est la recherche menée par Jerzy Gawronski sur l'*Amsterdam*, navire de la Compagnie hollandaise des Indes Orientales – ou VOC – qui s'échoua sur la côte anglaise, près d'Hastings, lors de son voyage inaugural, en 1749. L'article, d'un intérêt exceptionnel, dont une large partie se consacre à des aperçus méthodologiques essentiels, montre comment l'étude

de cette épave n'apporte pas seulement des données sur le navire lui-même mais sur sa cargaison, et par là sur « l'économie et la production urbaines » de la ville d'Amsterdam à cette époque. L'archéologie sous-marine permet ainsi de déboucher sur l'histoire économique, industrielle (la construction navale mais aussi les produits emportés) et même sociale du grand port hollandais, ce qui est fascinant. Une synthèse conclusive de Gérard Le Bouëdec permet de replacer l'ensemble dans son contexte et de mieux en apprécier la richesse.

12

Le caractère novateur du dossier qui expose les récentes avancées de l'archéologie sous-marine est prolongé aussi bien par l'ensemble du deuxième dossier – la présentation de leurs recherches par sept doctorants – que par les quatre articles de *Varia*. Deux des textes se rapportent encore à l'archéologie maritime, qu'il s'agisse de la transformation des littoraux de la pointe du Médoc de la fin du XVI<sup>e</sup> au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (Pierre Caillosse), ou de l'étude des coquillages découverts en contexte archéologique entre Manche et Garonne (Laura Le Goff et Catherine Dupont). Mais nous en sommes très loin lorsqu'il s'agit du rôle de la Marine dans la réorganisation du renseignement américain après 1945 (Philippe Ramos), des possibilités offertes par l'utilisation des *U-Boot-Bunkers* construits par les Allemands dans les villes portuaires françaises de la côte atlantique et de l'évolution de celle-ci (Jean-Baptiste Blain), ou de la présence russe dans le Pacifique Sud sous Alexandre I<sup>er</sup> (Irina Tsitovitch-Kozlova), sans oublier le conflit franco-anglais à propos des boutres « tricolores » en mer d'Oman et dans le nord de l'océan Indien à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (Guillemette Crouzet). Les rapports avec la « Barbarie » au XVIII<sup>e</sup> siècle sont abordés par deux textes, l'un consacré aux conditions de vie, de l'autre côté de la Méditerranée, des employés de la Compagnie d'Afrique (Olivier Lopez), l'autre aux opérations militaires contre Tunis et Tripoli entre 1727 et 1729 (Pierre Le Bot). Nous restons au XVIII<sup>e</sup> siècle avec Claire Boër, qui analyse les conditions de vie des marins provençaux au XVIII<sup>e</sup> siècle, cependant qu'Antoine Rivault montre la complexité, au milieu du XVI<sup>e</sup> siècle, du rôle de gouverneur d'une province maritime, la Bretagne, à travers l'étude du duc d'Étampes qui occupa ce poste de 1543 à 1565. Enfin, Jean-Marie Kowalski met à profit le cinquantenaire de l'inauguration de la nouvelle École navale de Lanvéoc-Poulmic par le général de Gaulle pour nous exposer comment celle-ci a été décidée et construite.

Le numéro est complété, comme de coutume, par les comptes rendus que précèdent la position de thèse de Géraldine Barron-Fortier qui fait revivre la figure de l'amiral Pâris, centrale pour l'histoire de notre Marine nationale dans la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, et le rappel du souvenir de deux grandes figures de l'histoire maritime qui viennent de nous quitter, Jean Boudriot et Paul Butel.

I. DOSSIER

**Les nouveaux enjeux  
de l'archéologie sous-marine**





## LES NOUVEAUX ENJEUX DE L'ARCHÉOLOGIE SOUS-MARINE

*Christophe Cérino, Michel L'Hour, Éric Rieth*

Le dossier principal de ce numéro 21 de la *Revue d'histoire maritime* a été édité avec le soutien du Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (DRASSM) du ministère de la Culture, de l'UMR CNRS 6258 CERHIO – université de Bretagne sud –, du GIS d'histoire maritime et de la FED (Fédération d'histoire & d'archéologie maritime) – université de Paris IV-Sorbonne. Nous tenons à leur en témoigner notre vive reconnaissance.

Nous tenons également à remercier nos collègues Philippe Jarnoux et Pierrick Pourchasse – EA CRBC – pour avoir pris en charge la coordination des échanges avec le Bureau de traduction universitaire de l'université de Brest qui a assuré les conversions de l'anglais vers le français.

Il est l'aboutissement d'une démarche collective menée pendant plusieurs années. En juin 2009, le DRASSM du ministère de la Culture et le Centre de recherche historique de l'ouest – UMR CNRS 6258 CERHIO – ont organisé à l'université de Bretagne-sud un grand colloque international, « Archéologie sous-marine et patrimoine. Des pratiques aux enjeux de médiation », qui a rassemblé une cinquantaine d'archéologues et d'historiens maritimes. Il s'agissait à cette occasion de faire, d'une part, un état des lieux de la recherche en archéologie sous-marine et de ses grands apports scientifiques depuis la seconde moitié du <sup>xx</sup>e siècle, d'autre part de mieux saisir son articulation avec le concept global de patrimoine<sup>1</sup>. Cinq ans se sont écoulés depuis cette manifestation. Aussi, fidèles aux engagements pris en 2009, nous nous sommes donné cette fois pour objectif de faire le point sur les dernières grandes innovations de la discipline et sur ses nouvelles problématiques de recherche. Le présent numéro de la *Revue d'histoire maritime* s'inscrit en outre dans le prolongement des échanges intervenus lors de la table ronde interdisciplinaire sur « Les nouveaux enjeux de la recherche en archéologie sous-marine », co-organisée à Lorient le 15 avril 2014 par

1 Christophe Cérino, Michel L'Hour, Éric Rieth, *Archéologie sous-marine. Pratiques, patrimoine, médiation*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2013.

le CERHIO et le DRASSM<sup>2</sup>. Publié dans une revue d'histoire, ce numéro thématique consacrée à l'archéologie sous-marine a aussi pour ambition, dans l'esprit d'interdisciplinarité de cette table ronde, de rappeler et de souligner qu'au-delà des méthodes, des techniques, et des problématiques propres à l'étude des « documents papiers » et des vestiges archéologiques sous-marins, il n'existe fondamentalement qu'une même science historique.

16

Depuis ses balbutiements scientifiques, dans les années 1950, jusqu'à nos jours, le chemin parcouru par l'archéologie sous-marine en termes de méthodes de recherche est considérable. À l'aube d'un nouveau siècle, l'ambition portée par les chercheurs n'est pas moins que de s'affranchir des deux contraintes majeures inhérentes au milieu marin et à l'archéologie : difficulté voire impossibilité des interventions humaines en profondeur, et déconstruction généralement irréversible des vestiges étudiés. En conjuguant les progrès technologiques récemment accomplis dans le domaine de l'exploration sous-marine civile ou militaire avec la révolution robotique en marche, il s'agit désormais d'inventer les outils et la méthodologie qui permettront d'explorer les gisements vierges de toutes prédatons et perturbations d'origine anthropique, localisés à plusieurs centaines, sinon plusieurs milliers de mètres de profondeur.

Par ailleurs, le développement des techniques de photogrammétrie numérique sous-marines constitue une avancée majeure pour les relevés infographiques en 2D et 3D. Sans négliger l'extrême rigueur des chaînes procédurales qu'il convient encore pour l'essentiel d'inventer afin de produire des données fiables, ces nouveaux outils numériques ouvrent la voie à des relevés qui permettront de virtualiser les vestiges engloutis. L'enjeu n'est rien moins que d'offrir à l'avenir la possibilité aux archéologues de « jouer et rejouer » en amont de la phase de terrain et dans un environnement numérique immersif les phases cruciales d'une opération de fouille. Considéré autrefois comme relevant d'un rêve inaccessible, cette ambition semble en passe d'être satisfaite, ainsi qu'en témoignent les diverses expérimentations en cours, notamment sur l'épave du vaisseau *Lune*, perdu par 91 mètres de profondeur au large de Toulon. L'archéologue humanoïde capable d'intervenir jusqu'à deux mille mètres de

---

2 Il ne s'agit pas ici de la publication de cette journée, dont Gérard Le Bouëdec rend compte sous la forme d'une synthèse en fin de volume, mais d'un élargissement d'une partie des thèmes qui y furent abordés par Pascal Arnaud (Institut universitaire de France - UMR 5189 HISOMA, Université Lyon II) / Christophe Cérino (UMR 6258 CERHIO, Université de Bretagne-sud) / Franca Cibecchini (DRASSM, ministère de la Culture) / Dominique Frère (UMR 6258 CERHIO, Université de Bretagne-sud) / Jean-Pierre Joncheray (FFESSM) / Gérard Le Bouëdec (DRASSM, ministère de la Culture) / Michel L'Hour (DRASSM, ministère de la Culture) / Sylviane Llinares (UMR 6258 CERHIO, Université de Bretagne-sud) / Éric Rieth (UMR 8589 LAMOP, Université de Paris I – Musée national de la Marine).

fond ne séjourne plus seulement dans l'imaginaire des passionnés de science-fiction : il a déjà commencé sa lente incubation dans les laboratoires...

Au-delà de la création de modèles numériques d'épaves et de l'acquisition de données fiables et pertinentes s'affranchissant des limites de la plongée humaine, l'informatique s'apprête à révolutionner le champ des interprétations comme des stratégies scientifiques en favorisant un questionnement permanent et formateur sur la validité des résultats et la « scénarisation » pour essai des hypothèses de recherche en présence. Par la simulation, il est ainsi possible d'envisager des *scenarii* de chargement de la cargaison et du lest, de mieux appréhender la nature et l'architecture des vestiges disparus, de modéliser et confronter des conceptions de coques, ou d'étudier leurs comportements en navigation au gré de conditions météorologiques diverses... Si les technologies réclament encore d'être améliorées, puisqu'elles ne permettent pas, pour l'heure, de s'affranchir de la réalisation de modèles réels, le transfert des outils informatiques aujourd'hui mobilisés dans les domaines de la construction navale et de l'aéronautique va bouleverser à court terme – n'en doutons pas – le champ méthodologique et le cadre de recherche des archéologues sous-marines de demain.

Outre la robotique et l'informatique, cette ouverture à l'interdisciplinarité de l'archéologie sous-marine permet de renouveler ses propres questionnements sur la formation des dépotoirs portuaires, les conditions de mouillage des navires, les formes de gouvernails, ou encore la reconstruction des réseaux du commerce maritime à différentes périodes. Dans des perspectives diachroniques et pluridisciplinaires, elle peut aussi bien apporter sa contribution scientifique pour chercher à comprendre l'évolution des environnements littoraux au cours des dix mille dernières années que pour intégrer les traces les plus récentes des conflits contemporains, lesquelles constituent autant de mémoires sensibles propres à générer l'émergence de nouveaux enjeux sociétaux, notamment de commémoration. C'est à la découverte de quelques-uns des aspects de ces récentes évolutions de l'archéologie sous-marine que les contributions rassemblées dans ce numéro invitent le lecteur.



*Les nouvelles technologies au service  
de la recherche subaquatique*



## APPLICATION DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE EN ARCHÉOLOGIE NAVALE

*Vincent Dumas, Philippe Groscaux †, Giulia Boetto*  
*Université d'Aix-Marseille, UMR CNRS 7299, Centre Camille Jullian*

Dès les années 1960, la nécessité de disposer de relevés fiables des gisements archéologiques sous-marins a poussé les chercheurs à développer des méthodes adaptées à la nature des vestiges : cargaison, coque nue..., et à leur milieu environnemental. Tout d'abord stéréoscopiques, les premières applications ont été réalisées sur l'épave byzantine Yassi Ada 1 (Turquie, VII<sup>e</sup> s. apr. J.-C.). En France, cette technique de relevé a été utilisée à partir des années 1970 pour l'étude des coques des épaves Planier 3 (Bouches-du-Rhône, 50 av. J.-C.) et Madrague de Giens (Var, 75-60 av. J.-C.). Dans la décennie suivante, des applications réduisant le temps de travail sous-marin ont été également réalisées sur l'épave Grand-Ribaud D (Var, entre l'an 9 av. J.-C. et le changement d'ère). Par la suite, le passage au numérique a permis une utilisation de plus en plus fréquente de la photogrammétrie en milieu immergé, notamment pour modéliser les cargaisons, en particulier celles qui sont situées à très grande profondeur. D'autres expériences se sont attachées à construire des réseaux de points de référence fiables et à positionner des éléments archéologiques au cours de la fouille, comme sur l'épave dite du *navis lapidaria* de Kizilburun (Turquie, I<sup>er</sup> s. apr. J.-C.).

Les derniers procédés de génération de nuages de points par corrélation épipolaire dense tendent désormais à bouleverser la manière d'aborder le relevé archéologique que ce soit en milieu terrestre ou en milieu immergé ; en outre, la diminution des coûts du matériel d'acquisition, la puissance croissante des calculateurs et le développement d'un nombre de plus en plus important de solutions logicielles commerciales ou issues du monde du logiciel libre rendent cette technologie de relevé abordable à tout point de vue.

Depuis 2008, l'équipe d'archéologie navale du Centre Camille Jullian s'attache à développer un mode opératoire cohérent et aisément reproductible de relevés basés sur l'utilisation de la photogrammétrie numérique en adéquation avec ses problématiques de recherche. Il est adapté à l'objet à relever, c'est-à-dire les vestiges des navires, considérés comme des structures flottantes complexes

organisées spatialement. Cet article vise à partager notre expérience et notre méthodologie de travail. Elles s'inscrivent dans une démarche globale qui consiste à établir une documentation graphique normalisée et objective devant servir de support à l'élaboration des différentes hypothèses de recherche. Nous verrons que l'utilisation de la photogrammétrie numérique, dans le cadre des opérations archéologiques sous-marines, entraîne des évolutions de la chaîne opératoire, notamment en ce qui concerne la préparation de l'épave avant le relevé. Trois objectifs guident notre démarche. Le premier consiste à disposer d'une base de mesures précises, permettant de réaliser l'ensemble de la documentation en deux dimensions – planimétries, sections, orthophotographies – pour décrire graphiquement la géométrie et l'organisation de la structure avec une fiabilité identique à celle qui pourrait être obtenue sur terre. Ce relevé doit également pouvoir être exploitable en trois dimensions lors de la réalisation de maquettes virtuelles destinées à servir de base aux travaux de restitution d'architecture navale. Le deuxième objectif concerne la nécessité de pouvoir effectuer des relevés successifs dans le même système de coordonnées afin de positionner la structure dans son environnement géoarchéologique et de pouvoir superposer les différentes unités stratigraphiques reconnues. Enfin, le dernier but est de réaliser un relevé conservatoire puisque l'objet archéologique étudié est de toute manière destiné à être dégradé par l'action du milieu et de la fouille archéologique – prélèvements, fragilisation des structures.

Les exemples dont il est question dans cet article sont issus des activités de recherche menées depuis 2007 en Croatie où quatre épaves ont bénéficié de nos applications photogrammétriques: en Dalmatie, à Pakoštane et Caska, et en Istrie à Zambratija. L'épave de Zambratija gît à une faible profondeur au nord d'Umag, près de la frontière entre la Croatie et la Slovénie. Objet de plusieurs campagnes de fouille dirigées par Ida Koncani Uhač du Musée archéologique d'Istrie, l'épave a été intégralement dégagée lors de la dernière campagne de 2013 réalisée en collaboration avec le Centre Camille Jullian. Les vestiges, conservés jusqu'au plat-bord sur 6,7 mètres de longueur pour une largeur maximale de 1,6 mètres, sont datés entre le XII<sup>e</sup> et le X<sup>e</sup> siècles av. J.-C. Entièrement assemblé par des ligatures, ce bateau cousu de Zambratija appartient à la famille des monoxyles assemblés car la structure axiale sur laquelle ont été dressés les flancs est constituée d'un tronc monoxyle creusé à l'intérieur et sculpté à l'extérieur pour former un massif d'extrémité, probablement la proue, à la forme très effilée (**fig. 1**).

Les recherches menées à Caska, sur l'île de Pag, au nord de Zadar, dirigées par Irena Radić Rossi et Giulia Boetto, s'inscrivent dans une collaboration associant l'université de Zadar et le Centre Camille Jullian, avec le soutien du Ministère de la Culture de la République de Croatie, de la ville de Novalija et, pour la France,





Fig. 1. Vue du bateau cousu de l'âge du Bronze de Zambratija, Croatie ; Mission franco-croate : Musée archéologique d'Istrie – CCJ. Cliché : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CC)

du Ministère des Affaires étrangères et du Développement international et du CNRS. Elles se concentrent depuis 2009 sur les aménagements portuaires d'un grand complexe résidentiel d'époque impériale appartenant à une importante famille de l'ordre sénatorial, les *Calpurnii* (fig. 2). Deux bateaux, coulés et remplis de pierres, ont été réutilisés ici pour servir de base à l'édification des débarcadères. Le premier, Caska 1, a été fouillé en 2009-2010. Les vestiges, conservés sur environ huit mètres de long et 1,7 m de large, présentent un bordé et une quille assemblés par des ligatures. À l'origine, il s'agissait d'une barque d'environ une dizaine de mètres de long dont le bois utilisé pour sa construction a été daté de la période allant de 42 à 104 apr. J.-C. La deuxième épave, Caska 2, a été découverte en 2012 et a été partiellement fouillée en 2013-2014. Conservée sur environ quatorze mètres de long et sur cinq mètres de large, elle se compose de vingt-quatre membrures et d'un bordé simple à franc-bord, assemblé par des tenons chevillés<sup>1</sup>.

La fouille de l'épave de Pakoštane s'est déroulée en 2007-2008 dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Zadar, l'Institut de Conservation Croate, le Centre Camille Jullian et l'association *Arkaeos*<sup>2</sup>. Cette épave,

1 Giulia Boetto et Irena Radić Rossi, « Au large de la Dalmatie. Nouvelles recherches d'archéologie navale », dans Patrice Pomey (dir.), « Ports et navires dans l'Antiquité et à l'époque byzantine », *Dossiers d'Archéologie*, n° 364, juil.-août 2014, p. 52-55.

2 Les opérations ont été placées sous la responsabilité d'Irena Radić Rossi, Giulia Boetto et Sabrina Marlier.



Fig. 2. Travail sous-marin sur le site de l'épave romaine Caska 2, île de Pag (Croatie). En arrière plan, le trait de littoral objet des recherches et l'emplacement de l'épave Caska 1. Mission franco-croate : Université de Zadar – CCJ. Cliché : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CCJ)

conservée sur onze mètres de long et sept mètres de large, datée entre la fin du IV<sup>e</sup> et le début du V<sup>e</sup> siècle apr. J.-C., correspond à un voilier de transport maritime construit à franc-bord selon un principe et des procédés de construction « longitudinal sur bordé ». Les assemblages entre les virures de bordé sont de fait assurés par un réseau homogène de tenons chevillés (fig. 3)<sup>3</sup>.

Enfin, nous avons pu appliquer nos procédés de relevé photogrammétrique sur deux épaves grecques dans le cadre du projet *Thales* du ministère grec pour l'Éducation et l'Union européenne « *MERMAID: Saving wooden shipwrecks in the Mediterranean marine ecosystem: Research, development and application of innovative methods of in situ protection* », placé sous la responsabilité d'Anastasia Pournou du *Technological Education Institute* d'Athènes. Il s'agit des épaves postmédiévale de Zakynthos et médiévale du port de Rhodes, dont les opérations de fouille, pour l'heure dans un stade très préliminaire, ont été dirigées respectivement, par Katerina Dellaporta (2012) et George Koustouflakis (2013) du ministère grec de la Culture, Éric Rieth ayant assuré les observations d'architecture navale.

3 Giulia Boetto, Irena Radić Rossi, Sabrina Marlier, Zdenko Brusić (dir.), « L'épave de Pakoštane, Croatie (fin IV<sup>e</sup>-début V<sup>e</sup> siècle apr. J.-C.). Résultats d'un projet de recherche franco-croate », *Archaeonautica*, n° 17, 2012, p. 105-151.

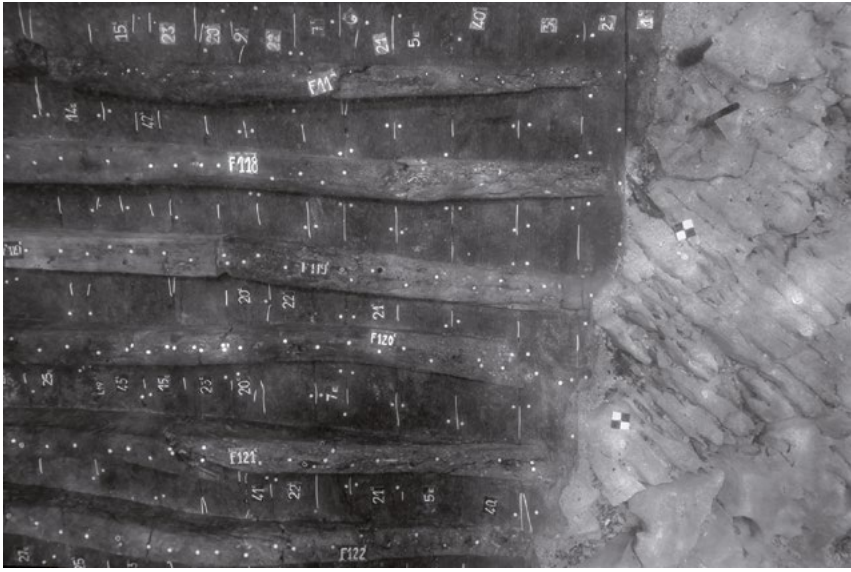


Fig. 3. Vue de la coque de l'épave de l'Antiquité tardive de Pakoštane (Croatie) avec tous les types de marquages utilisés. Mission franco-croate : UniZd – CC).  
Cliché : Ph Groscaux (CNRS-AMU, CC)

#### IMPACT DE L'UTILISATION DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE SUR LE DÉROULEMENT DE LA FOUILLE

L'utilisation de la photogrammétrie dès le début des opérations permet d'assurer une documentation normalisée de l'ensemble du processus de fouille et de l'organisation stratigraphique du site. Dans le cas des vestiges de bateaux, elle permet de documenter chaque ensemble structurel avant leur démontage – serres, vaigrage et carlingue, membrures, bordé et quille<sup>4</sup>. En effectuant des passes successives après la mise en évidence d'unités stratigraphiques nouvelles ou d'ensembles structurels, nous obtenons une image tridimensionnelle superposable de l'état d'avancement des travaux. Le géoréférencement garantissant la cohérence du positionnement est assuré par un réseau de points d'appui créé en amont. Par exemple, lors de la fouille du bateau Caska 2 nous avons pu obtenir la documentation complète de son comblement de pierres puis, une fois les blocs enlevés, des premiers vestiges visibles de l'épave (fig. 4). Dans le cas de Zambratija, deux séries de relevés photogrammétriques ont permis de documenter l'épave avant et après le démontage des membrures.

4 Cette méthode de travail par niveaux successifs correspondant à des ensembles structurels sur des épaves à structures complexes, avec relevés correspondant superposables, a été définie et mise en place sur la fouille de la Madrague de Giens : cf. André Tchernia, Patrice Pomey, Antoinette Hesnard *et al.*, *L'Épave romaine de la Madrague de Giens (Var), Campagnes 1972-1975*, Paris, CNRS, XXXIV<sup>e</sup> Suppl. à *Gallia*, 1978.

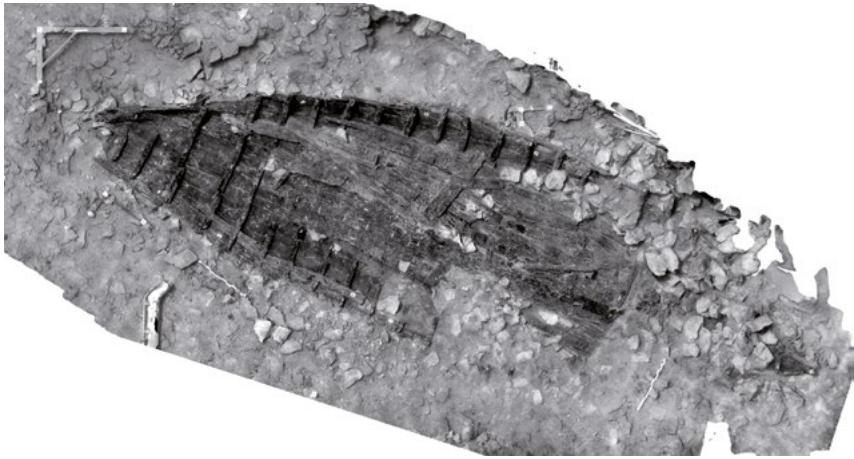


Fig. 4. Ortho-photographie de l'épave Caska 2 au terme de la campagne 2014.  
Mission franco-croate : UniZd – CCJ.  
Restitution photogrammétrique : V. Dumas, Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CCJ)

En ce qui concerne l'étude de l'épave, la partie dévolue aux observations, aux mesures et aux relevés *in situ* est une phase chronophage qui devient une contrainte majeure avec l'augmentation de la profondeur. La photogrammétrie numérique affranchit l'archéologue de lourdes tâches nécessaires à l'obtention de relevés précis – triangulations, nivellement, relevé à l'échelle. Toutefois, elle ne le libère pas du nécessaire travail d'observation et d'interprétation préliminaire indispensable à la réalisation d'une couverture « interprétée », c'est-à-dire légendée par marquage de façon à faire apparaître ce que l'on veut voir figurer – marquage des différents types d'assemblages notamment. Le travail d'observation sur les parties cachées correspond à un autre niveau de relevé et devra faire l'objet dans un second temps de relevés particuliers dont le mode peut être variable selon la nature et la position de la pièce – avec ou sans prélèvement. En effet, la réalisation de relevés manuels *in situ* permet une observation fine de la structure, chose qui s'avère plus difficile, voire impossible, *a posteriori*, sur un modèle 3D des vestiges obtenu grâce à la photogrammétrie.

#### LE POSITIONNEMENT

Dans le cas d'opérations se déroulant dans la zone infralittorale, donc à faible profondeur, et sur des structures associées ou susceptibles d'être associées à des installations terrestres, il est nécessaire de choisir un système de référence planimétrique homogène afin d'obtenir une vision d'ensemble de l'organisation du site. Il s'agit de préférence du système de projection

nationale de la région d'intervention<sup>5</sup>. Un rattachement au réseau de nivellement officiel, à ne pas confondre avec le zéro hydrographique, est également nécessaire<sup>6</sup> afin de comprendre le rapport existant entre les structures étudiées et le niveau de la mer pour l'époque historique concernée<sup>7</sup>. Ce géoréférencement est associé à une organisation raisonnée et systématique des données enregistrées. Il nous permet de superposer, croiser et gérer avec précision les couches d'informations spatialisées issues d'études pluridisciplinaires – fonds cartographiques, orthophotographies, relevés bathymétriques, résultats de prospections géophysiques, carottages et modélisations des différentes couches relevées – au sein d'un système d'information géographique<sup>8</sup>.

Dans la bathymétrie comprise entre le trait de côte et cinq mètres de profondeur, le géoréférencement s'effectue selon le même protocole qu'un relevé terrestre. Des points de stations sont positionnés à proximité de la zone à relever en se référant à des repères géodésiques présents sur le pourtour du littoral. À partir de ces stations géoréférencées, des points d'appuis matérialisés autour de la structure à étudier sont mesurés depuis la côte à l'aide d'une station totale visant un prisme monté sur une canne extensible (fig. 5). Sur des fonds sableux, il est impossible d'utiliser des détails naturels – rochers – comme supports aux points de repères. La fixation de ces derniers sur les structures des épaves n'est pas non plus une option valable à long terme car, une fois libérées des sédiments, celles-ci subissent des dégradations – déplacements, ruptures –, qui s'aggravent dans le cas de fouilles pluriannuelles prévoyant l'ensevelissement et la réouverture du gisement. Nous choisissons donc d'implanter un réseau suffisamment dense de points artificiels<sup>9</sup> afin de pallier leurs éventuelles disparitions suite à l'extension du périmètre de la fouille ou à leurs arrachements accidentels.

Ces repères, supportant des cibles codées, doivent permettre le rattachement des futures couvertures photogrammétriques au système de coordonnées

5 Pour la France, le Lambert 93 ou une des projections coniques conformes associées ; pour la Croatie, la projection HTRS96/TM. HTRS

6 Pour la France NGF-IGN 69 ; pour la Croatie HVRS71.

7 Éric Fouache, Sania Faivre, Jean-Jacques Dufaure, Matthieu Ghilardi, Vladimir Kovacic, Marie-Brigitte Carre et Francis Tassaux, « 5000 ans d'évolution relative du niveau marin en Istrie : qu'en est-il à l'époque romaine ? », dans Marie-Brigitte Carre, Vladimir Kovacic, Francis Tassaux (dir.), *L'Istrie et la mer. La côte du Parentin dans l'Antiquité*, Bordeaux, Ausonius Éditions, coll. Mémoires, n° 25, 2011, p. 69-88 ; Vincent Dumas, « Méthodes de relevé de vestiges submergés », dans *L'Istrie et la mer, op. cit.*, p. 121-124.

8 ArcGIS, éd. Esri.

9 Des fers à béton de grosse section ou des piquets zingués avec verrou enfoncés le plus profondément qu'on l'a pu puis bétonnés aux blocs les plus proches lorsque cela est possible.

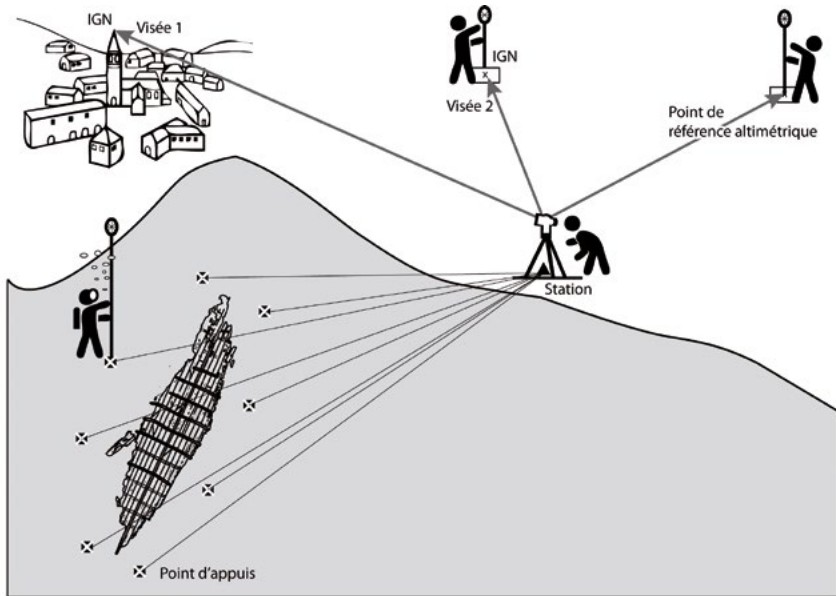


Fig. 5. Schéma montrant le procédé type du relevé topographique depuis la côte (rattachement au système planimétrique et altimétrique national) de vestiges immergés. Dessin : V. Dumas (CNRS-AMU, CC)

globales. Cependant, les incertitudes de mesure liées à l'éloignement de la côte et à la hauteur de canne porte prisme engendrent un positionnement de précision centimétrique (fig. 6) ; trop imprécis, ils ne peuvent pas être utilisés durant la première phase de calcul photogrammétrique. Dans un premier temps, nous plaçons donc à proximité des structures un système de coordonnées local temporaire. Ce dernier est matérialisé à l'aide d'une équerre métallique posée à l'horizontale et orientée au nord magnétique (fig. 7). Plus l'équerre est grande, plus l'horizontalité est précise. Trois points, ou mieux trois cibles codées, qui permettent un positionnement plus précis, sont situés de manière à définir un système de coordonnées cartésiennes dont les valeurs (X, Y, Z) seront utilisées lors de la phase de calcul photogrammétrique. Ce procédé nous permet d'obtenir un modèle à l'échelle, orienté au nord magnétique et selon un axe horizontal. Une fois le modèle calculé et exporté dans le logiciel d'exploitation, celui-ci est réorienté sur la base d'au moins trois points d'appuis artificiels. Les coordonnées des autres points d'appuis sont alors mesurées sur le modèle et peuvent ensuite être utilisées comme points de référence pour les calculs photogrammétriques suivants. L'utilisation d'un cube afin de matérialiser un système de coordonnées en trois dimensions s'est avérée infructueuse. Trop grand, son volume compliquait la phase d'acquisition, plus petit il perdait sa pertinence sur l'horizontale.



Fig. 6. Relevé topographique de l'épave Caska 2 : un opérateur assure le positionnement sur le fond de la canne qui est maintenue à la verticale et stabilisée par un second opérateur, tandis qu'un troisième, à la surface, réalise un croquis et garantit la communication avec la station de relevé à terre. Mission franco-croate : UniZd – CCJ. Cliché : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CC)



Fig. 7. Équerre métallique servant de système de référence local (1) et points d'appuis géoréférencés (2) utilisés pour le relevé photogrammétrique de l'épave Caska 2. Mission franco-croate : UniZd – CCJ. Cliché : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CC)

Lors de la phase dévolue aux observations, il est nécessaire que les structures dégagées soient parfaitement propres pour permettre aux archéologues une lecture précise des détails parfois peu visibles – joints des virures, assemblages, traces d'outillage, marques de construction<sup>10</sup>. L'élimination des éléments résiduels – sédiments, algues – pouvant masquer ces détails est, bien entendu, indispensable avant la phase consacrée au relevé photogrammétrique. Pour obtenir un résultat optimal, il est souhaitable de consolider les structures les plus fragiles, par exemple avec des tiges inoxydables (fig. 8), afin de les maintenir en place et ne pas risquer qu'elles glissent ou se déplacent lors des diverses prises de vue. Il est également important de prévoir une zone ouverte et propre d'environ cinquante centimètres autour des vestiges à modéliser afin de bien les mettre en évidence et de les protéger d'éventuels glissements des parois du sondage. Le marquage des structures représente une autre étape fondamentale avant la réalisation de la couverture photogrammétrique. On insistera donc sur les modes de réalisation et les matériaux à choisir de préférence car ceux-ci peuvent affecter le résultat final, c'est-à-dire le modèle 3D.

En général, deux types de marquages sont réalisés sur les vestiges conservés des épaves. Le premier consiste à identifier par un code alphanumérique chacun des éléments architecturaux. Le second est utilisé afin de matérialiser les détails peu visibles comme les joints entre virures ou les assemblages<sup>11</sup>. Pour ce qui concerne les étiquettes portant le code alphanumérique, un texte jaune sur fond noir semble offrir le bon compromis entre contraste et lisibilité. Les aplats blancs sont à proscrire puisqu'ils peuvent engendrer des reflets, source d'erreurs durant la phase de calcul photogrammétrique. La taille des étiquettes doit assurer la lisibilité du texte, mais elle ne doit pas masquer les détails architecturaux. L'utilisation d'imprimantes portables à étiquettes, type *Dymo*, permet de préparer des étiquettes standard et discrètes, qui sont néanmoins très lisibles sur les modèles 3D texturés<sup>12</sup> et les orthophotographies (fig. 8). Il est cependant primordial de bien fixer ces éléments à la structure afin d'éviter leur déplacement durant la phase de prise de vues, car cela pourrait perturber le calcul du modèle.

Le marquage de détails, comme les chevilles bloquant les tenons ou les ligatures, ainsi que les gournables assemblant les membrures au bordé, s'effectue au moyen de punaises ou épingles de taille et de couleurs différentes selon le type d'assemblage (fig. 8)<sup>13</sup>. En revanche, l'utilisation de ces marqueurs pour la

10 Patrice Pomey, Éric Rieth, *L'archéologie navale*, Paris, Éditions Errance, coll. « Archéologiques », 2005, p. 98-99.

11 P. Pomey, É. Rieth, *L'Archéologie navale, op. cit.*, p. 99-102.

12 Les modèles 3D texturés sont des modèles surfaciques maillés en 3 dimensions dont le rendu est effectué par le placage de l'image numérique correspondant à la surface saisie.

13 Les couleurs les plus utilisées sont le blanc et le jaune.





Fig. 8. Sur l'épave de Zambratija, les lattes en bois servant à assurer l'étanchéité des joints de bordé sont maintenues en place lors de la fouille à l'aide de fils d'inox. Les points blancs (épingles à tête plastifiée) matérialisent l'emplacement des chevilles de blocage des ligatures, non conservées. Mission franco-croate : MAI-CCJ. Cliché : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CCJ)

matérialisation des clous demeure plus délicate car leur fixation est impossible sur le métal oxydé. Le recours à des tiges de fil de fer plastifié blanc terminant en boucle au niveau du clou disparu est donc souhaitable. Il faudra toutefois prendre soin de bien enfoncer ces tiges dans le bois pour éviter leur déplacement. Enfin, des agrafes en fil de fer plastifié sont aussi utilisées pour matérialiser les bords des virures de bordé.

Dans le cas de la restitution photogrammétrique multipoints de l'épave de Pakoštane et de la première épave de Caska, ces marqueurs ont été utilisés comme base pour la restitution. En revanche, lors de la restitution par corrélation épipolaire dense des épaves Caska 2 et Zambratija, ils n'ont pas été utilisés dans la phase de calcul. Cependant, ils ont permis d'optimiser la restitution graphique 2D ou 3D car ils indiquent clairement la position et la nature des éléments marqués.

Enfin, avant de réaliser les prises de vue, l'épave doit être dégagée de tout type de carroyage. Certainement très important comme système de référence ou d'appui pour les archéologues-plongeurs lors de la fouille (fig. 9), celui-ci devient gênant non seulement durant la phase d'acquisition – prises de vue –, mais aussi lors du calcul des modèles photogrammétriques. Sa présence engendre une augmentation du nombre des prises de vues et, par conséquent, du temps nécessaire au plongeur-photographe pour réaliser ce travail. En particulier, les

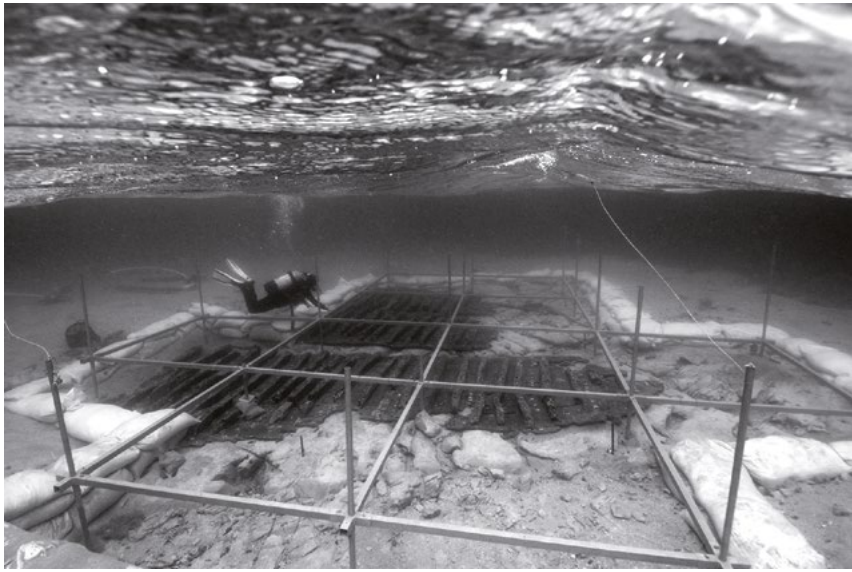


Fig. 9. Vue de l'épave de Pakoštane avec le carroyage en place.  
Mission franco-croate : UniZd – CCJ. Cliché : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CC)

carroyages en aluminium créent des zones de brillance – reflet des rayons du soleil ou du flash – qui ne sont pas correctement interprétées par les logiciels de photogrammétrie. De même, les carroyages matérialisés par des élastiques ou des décimètres provoquent des artefacts lors de la phase de calcul. *A posteriori*, l'opérateur photogrammètre sera obligé de masquer ces éléments perturbateurs sur l'ensemble des clichés afin d'éviter les erreurs de calcul lors de l'élaboration du modèle.

#### PHASE D'ACQUISITION

La phase d'acquisition du relevé photogrammétrique s'organise en deux temps. Le premier consiste à effectuer les derniers nettoyages de la zone, puis à positionner un certain nombre de repères. Comme nous l'avons déjà souligné, la présence d'une équerre permet d'assurer un système local de coordonnées. Par sécurité, nous préférons en installer au moins deux afin de nous prémunir en cas de problèmes de recouvrement et de vérifier l'échelle et l'horizontalité. Une ou plusieurs échelles photographiques sont installées horizontalement et parallèlement à l'axe de la quille afin, d'une part, de vérifier la cohérence de la mise à l'échelle du modèle et, d'autre part, de servir de référence métrique sur les différentes orthophotographies qui seront générées à partir du modèle. Enfin, par convention, une flèche est installée afin d'indiquer le Nord magnétique.

$$R \text{ (Résolution spatiale)} = \frac{Px \text{ (Pixel)} \times H \text{ (Hauteur de prise de vue)}}{f \text{ ( focale)}}$$

$$D \text{ (distance de prise de vues)} = \frac{R \text{ (Résolution spatiale souhaitée*)} \times f \text{ ( focale)}}{Px \text{ (Pixel)}}$$

**Exemple :** épave de Zambratija (Croatie),  
recherche du meilleur compromis entre distance de prise de vues et résolution recherchée

Boitier D700 : capteur 36 mm pour 4256 pixels soit 1 pixel = 0.00845 mm  
focale fixe : 24 mm  
Résolution souhaitée : 0.5 mm

$$D = \frac{0.5 \text{ mm (R)} \times 24 \text{ mm (f)}}{0.00845 \text{ mm}} = 1420 \text{ mm soit } 1.42 \text{ m}$$

\*Résolution spatiale : taille équivalente sur le terrain d'un pixel (GSD / ground sample distance)

Fig. 10. Calcul de la résolution spatiale d'une photographie et de la distance des prises de vues. Schéma : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CC)

La seconde phase est assurée par le photographe qui a pris soin d'effectuer des repérages soigneux, de vérifier les horaires et les coefficients des marées, les conditions de luminosité ou de turbidité qui peuvent évoluer fortement dans une même journée, afin de garantir une fenêtre de prise de vue permettant les meilleures conditions de visibilité possibles. La zone doit être dégagée de toute personne afin d'éviter le risque de pollution de la scène – déplacement d'éléments, particules. Avant chaque immersion, le photographe détermine le dispositif de relevé photogrammétrique. Dans l'objectif de mettre au point un procédé reproductible, nous avons choisi de travailler avec une solution professionnelle composée d'un boîtier numérique<sup>14</sup> et de son caisson associés à des flashes montés sur des bras articulés. En premier lieu, le photographe calcule la résolution approximative des clichés en fonction du capteur de l'appareil, de la distance de prise de vue et de la focale utilisée (fig. 10).

Ensuite, ce résultat lui permet de déterminer la superficie d'emprise d'un cliché et ainsi d'estimer approximativement le nombre d'images nécessaires à la couverture de la zone à relever. Cette estimation prend en considération un recouvrement minimum de 60 % de la surface de l'image qu'il est souhaitable d'augmenter en fonction de la complexité et du relief de la structure (fig. 11). Il devient donc possible d'évaluer plus finement le temps nécessaire aux prises de vues et d'organiser la plongée en fonction des conditions générales – marée, luminosité – et des priorités archéologiques – densification sur certains secteurs plus complexes.

<sup>14</sup> Nikon D700, doté d'un capteur plein format de douze méga pixels et de focales fixes de 24 ou de 20 millimètres.

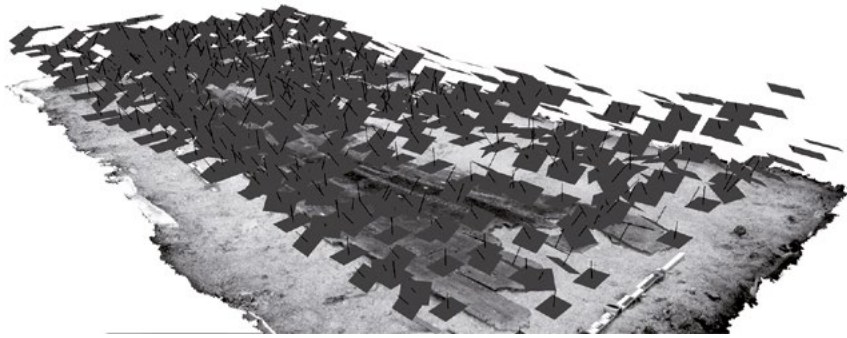


Fig. 11. Visualisation du positionnement des prises de vue utilisées pour le calcul du modèle 3D des vestiges de l'épave de Zambratija Mission franco-croate : MAI – CCJ. Restitution photogrammétrique : V. Dumas, Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CCJ)

140

Enfin, le photographe adapte son dispositif en fonction de la lumière disponible. À faible profondeur – jusqu'à moins de dix mètres – la lumière naturelle peut être suffisante. Cependant, l'utilisation combinée du flash permet de déboucher les zones d'ombre et de récupérer des informations de couleur. Au-delà de cette profondeur, il faut apporter sa propre source lumineuse : flash ou autre dispositif immergeable. Dans l'eau, les couleurs disparaissent avec la profondeur en raison du phénomène d'absorption sélective. Les couleurs chaudes – du rouge au jaune – disparaissent les premières. Si l'on souhaite obtenir un résultat final qui respecte les couleurs du sujet, il faut utiliser des flashes déportés munis de diffuseurs grand-angle couvrant la totalité du champ de la prise de vue. L'éclairage diffus évite des ombres portées tranchantes qui seraient sources d'erreurs lors du calcul du modèle. L'utilisation d'un flash directionnel, c'est-à-dire dans l'axe de l'objectif, fera apparaître les particules en suspension et les brillances éventuelles des surfaces photographiées provoquant également des erreurs de calcul. Afin de recalibrer les couleurs et d'obtenir un résultat colorimétrique proche de la réalité, une charte de couleur est immergée. Le code couleur choisi pour le marquage bénéficiera également de ce traitement, faisant réapparaître les nuances de couleur modifiées avec la profondeur.

Les photographies doivent être nettes car le flou est un autre obstacle majeur à la réalisation d'un modèle photogrammétrique. Le photographe s'appuie sur le trio diaphragme-vitesse-ISO afin de faire entrer la quantité de lumière nécessaire à la bonne exposition de l'image<sup>15</sup>.

15 Sous l'eau, peu de choix s'offrent à lui. La vitesse de synchro-flash des appareils photos, oscille le plus souvent entre 1/60<sup>e</sup> et 1/250<sup>e</sup> de seconde et dicte la vitesse d'obturation la plus rapide disponible. Par ailleurs, il est difficile de choisir une vitesse inférieure au 1/60<sup>e</sup> de seconde en raison du flou de bougé qui en résulterait et l'utilisation d'un pied pour ce type de travail se conçoit difficilement (lenteur d'exécution, pollution liée aux particules soulevées). D'après notre expérience, il s'avère qu'une vitesse de 1/125<sup>e</sup> de seconde permet d'utiliser la lumière ambiante tout en ayant des images nettes.

Le choix du diaphragme a une influence sur la profondeur de champ – zone de netteté en avant et en arrière du sujet sur laquelle la mise au point est faite – et donc un impact sur la netteté apparente. On recherche donc le diaphragme le plus fermé possible en évitant de sous-exposer l'image. Qui plus est, le bois gorgé d'eau a tendance à « absorber » la lumière. La solution pourra consister à ajuster la valeur ISO. En effet, les appareils professionnels, avec l'amélioration de la gestion électronique de la sensibilité des capteurs, permettent de recourir à la variable ISO pour regagner de la luminosité. Il faut cependant rester raisonnable pour éviter la formation de bruit numérique – pixels parasites sans relation avec le sujet – susceptible de fausser les calculs.

Pour contribuer à maximiser la profondeur de champ, la focale choisie est souvent courte<sup>16</sup>. Ce type de focale permet d'obtenir une très grande profondeur de champ avec des diaphragmes entre  $f/8$  et  $f/11$ , et donc une netteté apparente de tout le relief photographié. Un autre avantage de ces objectifs de type « grand-angle » est de nous permettre d'enregistrer une grande surface tout en restant proche du sujet. On évite ainsi au maximum les particules qui s'interposent entre l'objectif et le sujet et agissent comme des pièges à lumière. Cependant, ces optiques présentent certaines limites. D'une part, en présence de forts reliefs, afin de ménager les transitions entre les prises de vues et de garder un recouvrement de plus de 60%, le nombre de photos va fortement augmenter. D'autre part, l'éclairage du sujet devient également plus difficile puisqu'il faut faire passer un éclairage diffus, couvrant une grande surface dans une plus faible épaisseur d'eau.

Enfin, les photos sont enregistrées sous la forme de fichier brut (RAW). Certains logiciels de photogrammétrie – MicMac – sont capables d'intégrer directement ce format. Sous *Photoscan*, en revanche, nous devons « développer » ces RAW et les convertir en TIFF ou en JPEG. Ce développement se fait en appliquant des paramètres colorimétriques – charte de couleur immergée –, radiométriques et de contraste à l'ensemble du lot d'images. Durant la phase de calcul, l'utilisation du format TIFF non compressé est préférable au JPEG à l'origine de possibles erreurs. Cependant le nombre important d'images utilisées sur certains relevés complexes – plusieurs centaines – nous contraignent à utiliser le JPEG afin de réduire les temps de calculs.

#### PREMIERS ESSAIS AVEC *PHOTODELER* SUR LES ÉPAVES ROMAINES DE PAKOŠTANE ET DE CASKA (CASKA 1)

Les épaves Pakoštane et Caska 1 gisent à une profondeur comprise entre deux et trois mètres selon les fluctuations de la colonne de l'eau liées au

<sup>16</sup> 24 mm  $f/1,4$  voire 14 mm  $f/2,8$



Fig. 12 : Les reflets du soleil sur la surface de l'épave romaine Caska 1. Mission franco-croate : UniZd – CCJ. Cliché : L. Damelet (CNRS-AMU, CC)

phénomène du marnage qui, dans ces zones de l'Adriatique, peut atteindre les cinquante centimètres. Cette situation impacte fortement le relevé photographique. Le plongeur est contraint par le volume de son équipement : il évolue proche de la surface et perd donc en stabilité. Par ailleurs, à ces faibles profondeurs, la colonne d'eau ne joue pas son rôle de « diffuseur » et le jeu du soleil sur les vagues crée des tâches lumineuses changeantes sur la surface de l'épave et du fond marin (fig. 12). Aussi est-il préférable d'intervenir sous un ciel nuageux.

Dans le cas de Pakoštane, où les vestiges conservés se présentaient dans un état très écrasé et aplati, la maille très serrée des membrures – en moyenne 17,3 centimètres – a constitué un facteur pénalisant car ces éléments transversaux masquaient l'organisation du plan de bordé. Inversement, l'excellente qualité de conservation du bois a été un facteur positif rendant les bords des virures et les arrêtes des membrures parfaitement visibles et identifiables sur les photos. Sur l'épave Caska 1, au contraire, le facteur positif constitué par un écartement important des membrures – en moyenne 39,5 centimètres – fut contrebalancé par une moins bonne conservation générale des vestiges.

L'application choisie fut *PhotoModeler*<sup>17</sup>, une solution photogrammétrique multipoints peu coûteuse et simple à mettre en œuvre. Avant d'être adoptée dans

<sup>17</sup> éd. Eos Systems inc.

nos projets et afin de valider la méthodologie, plusieurs expérimentations sur des prototypes de vestiges d'épaves ont été réalisées, et les résultats ont été comparés avec ceux obtenus au moyen d'autres types de relevés – tachéométriques et manuels.

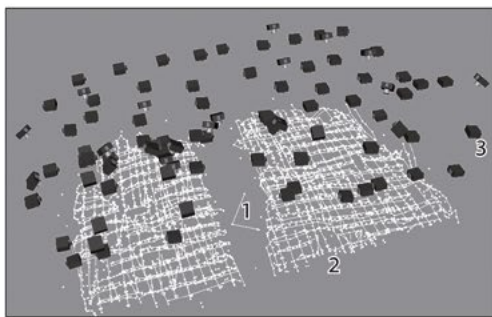
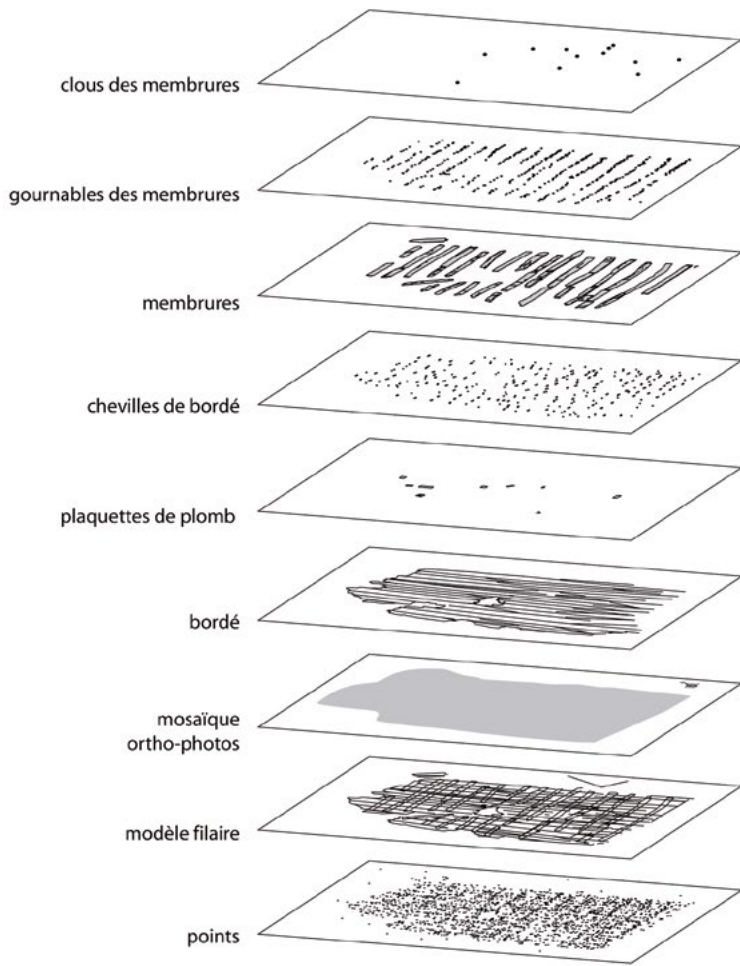
Pour chacune de ces deux épaves, la méthode de restitution photogrammétrique a consisté à modéliser les éléments architecturaux reconnus durant le marquage – chevilles, gournables – et les principaux alignements – bordé, membrure (fig. 13). L'opérateur recherche l'élément à modéliser et le pointe sur l'ensemble des clichés afin d'obtenir un modèle 3D filaire schématique de la forme de l'épave. Cependant, cette méthode basée sur des éléments géométriques simples – polygones, points, polygones – ne permet pas d'obtenir un rendu satisfaisant pour une structure aussi complexe<sup>18</sup>. Le modèle 3D filaire schématique obtenu, une fois mis à l'échelle et orienté, est exporté vers un logiciel de CAO/DAO (fig. 13) comme *AutoCAD*<sup>19</sup>. L'orthoplan – mosaïque de photos redressées – est alors créé à l'aide d'un applicatif lié à ce logiciel<sup>20</sup> destiné à redresser les clichés verticaux spécialement réalisés à cet effet. Au final, deux orthoplans sont réalisés : le premier, destiné au redressement du bordé, est effectué sur la base de l'ensemble des points matérialisant l'emplacement des chevilles – punaises –, des joints du bordé – agrafes –, complété par les cibles placées tout autour de l'épave. Le second orthoplan, destiné à présenter l'organisation des membrures, est créé en utilisant les gournables présentes sur la face supérieure de ces dernières. L'écrasement des structures étudiées conjugué à la densité des points d'appuis et au fort recouvrement permet un redressement de précision centimétrique. Ces deux images géoréférencées dans le même système de projection sont donc parfaitement superposables. Elles sont ensuite exportées vers un logiciel de vectorisation *Illustrator*<sup>21</sup> afin de dessiner une planimétrie complète des vestiges. Le temps de réalisation de la couverture photographique – deux heures environ – n'a rien à voir avec le temps qui aurait été nécessaire pour réaliser une planimétrie manuelle d'une moindre précision. Cependant, le temps de post-traitement – corrections chromatiques des clichés, calcul photogrammétrique, traitement des modèles 3D – des données brutes pour aboutir à la mise au net d'une planimétrie exploitable du point de vue de l'archéologue naval n'est pas négligeable : une à deux semaines.

18 Vincent Dumas, « Annexe : La photogrammétrie numérique appliquée à l'architecture navale : le cas de l'épave de Pakoštane », dans « L'épave de Pakoštane », art. cit., p. 143-145.

19 éd. *Autodesk*.

20 *RealView*, éd. *Vectar* ou *PhoToPlan*, éd. *Kubit*.

21 éd. *Adobe*.



- 1 - équerre étalon
- 2 - points et modèle filaire obtenus par photogrammétrie
- 3 - localisation des différents points de prise de vues utilisées sous PhotoModeler

Fig. 13. Organisation des différentes couches d'informations géo-référencées issues du travail de restitution photogrammétrique de l'épave de Pakoštane. Mission franco-croate : UniZd-CCJ. Schéma : V. Dumas (CNRS-AMU, CCJ)



## L'UTILISATION DE LA CORRÉLATION ÉPIPOLAIRE DENSE : MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE DES VESTIGES

L'utilisation de *PhotoModeler* dans sa version standard nous a permis d'obtenir de l'information 3D sur les éléments digitalisés, cependant le logiciel semble plus tourné vers la modélisation de structures régulières aux géométries élémentaires – bâtiments, objets manufacturés. Nous avons donc choisi d'évoluer vers une solution plus proche de nos besoins allée à une précision géométrique : à savoir l'utilisation de logiciels basés sur la corrélation épipolaire dense. Le principe de cette technologie est de retrouver automatiquement des points homologues dans plusieurs images et de pouvoir générer un nuage de points 3D coloré. Dernièrement, un grand nombre de logiciels ont été développés, rendant cette technologie abordable<sup>22</sup>.

Au final, le programme *Photoscan*<sup>23</sup> a été choisi car il répondait mieux que les autres à nos besoins archéologiques. Ce programme permet en effet de créer un nuage de points colorés géoréférencés et un maillage phototexturé. Le produit peut ensuite être décliné soit en orthophotographies – JPEG et GéoTIFF – selon des plans préalablement établis, soit comme modèle 3D exporté selon plusieurs formats d'échange de contenus tri-dimensionnels – PLY, OBJ, VRML, Collada, PDF. La chaîne de calcul afin d'obtenir un modèle 3D se décompose en plusieurs étapes (fig. 14) :

- identifier de manière automatique les cibles codées disposées sur le site qui permettront la mise à l'échelle et l'orientation du modèle ;
- indiquer, si possible, un système de projection – local ou absolu ;
- nettoyer les images en utilisant des masques pour supprimer du calcul certains éléments apparus de manière impromptue sur la scène pouvant générer des erreurs au niveau du calcul du modèle ou du texturage – poissons, éléments divers en mouvement comme des étiquettes mal fixées... ;
- déterminer les paramètres de correction à appliquer aux images et retrouver les points homologues sur l'ensemble des clichés pour obtenir la position de prise de vue de chacun d'eux ;
- rechercher et corrélérer les pixels identiques présents sur les différentes images et générer un nuage de points en 3D portant les informations colorimétriques de chaque pixel reconnu ;
- construire le maillage par triangulation sur la base du nuage de points denses précédemment construit ;
- texturer le modèle.

<sup>22</sup> Les plus utilisés dans nos disciplines sont des sous-licences monopostes payantes (*PhotoModeler Scanner* ou *Photoscan*), libres (*Micmac*, développé par l'IGN) ou basées sur le *cloud computing* (*123DCatch*).

<sup>23</sup> éd. *Agisoft*.

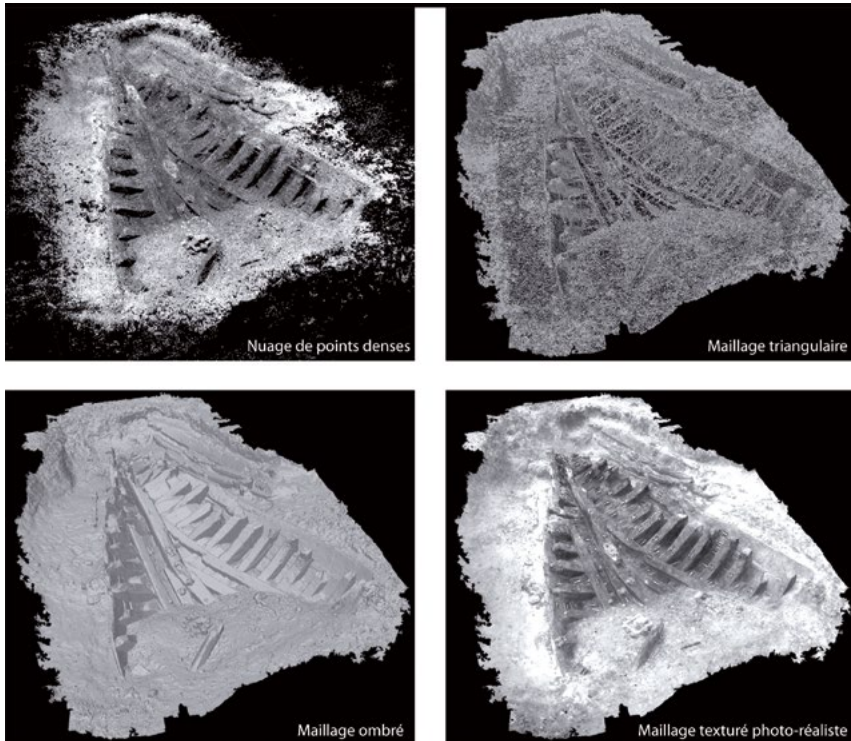


Fig. 14. Les diverses étapes de la réalisation du modèle 3D par « corrélation épipolaire dense » de l'épave postmédiévale de Zakynthos, Grèce. Projet MERMAID.  
Restitution photogrammétrique : V. Dumas, Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CC)

Une première expérimentation a été effectuée sur les épaves Caska 2 et de Zambratija. Le relevé du comblement de blocs de pierres de l'épave Caska 2, à une profondeur de trois à quatre mètres, a été effectué à l'aide du boîtier Nikon D700 équipé d'un objectif 24/ $f$ 1,4 mm. Pour 125 m<sup>2</sup> de surface couverte – épave et environs proches –, 966 clichés ont été nécessaires à une altitude moyenne de prise de vue au-dessus des vestiges de 1,38 mètres, soit une résolution de 0,004 m/pixel. Le degré de précision est plus important que nécessaire si l'on considère la typologie des structures à relever. Cependant, nous avons choisi de travailler avec un maximum de précision car l'objectif consistait également à calculer le positionnement de points de référence – fers à béton de 1,5 mètres enfoncés entre des blocs de calcaire et bloqués à l'aide de béton hydraulique – matérialisés autour de l'épave. Un second relevé destiné à reproduire la situation de fin de fouille a ensuite été réalisé avec le même boîtier Nikon D700 et un objectif 20/ $f$ 2,8 mm. Sur la même superficie de 125 m<sup>2</sup>, un plus grand nombre de clichés (1 567) pris à une altitude moyenne de 1,4 mètres – résolution : 0,0005 m/pixel – ont été nécessaires pour tenir compte du relief

plus accidenté notamment au niveau du fond de coque dégagé. Au final, ce second modèle obtenu se compose de 247 112 points par mètres carrés. Un maillage de quatre millions de faces a été effectué et une orthophotographie d'une résolution de 0,002 m/pixel a été générée afin d'établir un plan 2D.

Dans le cas de l'épave de Zambratija, située à une profondeur de 2,2 mètres, la surface relevée était moindre : 20 mètres carrés. Les fonds sableux ne permettant pas d'implanter durablement des repères sur le pourtour de l'épave et du fait de la courte durée de l'intervention de 2013, nous avons choisi de matérialiser ces repères sur l'épave. Deux couvertures photographiques ont été réalisées avant et après le levage des membrures afin de compléter la planimétrie du bordé. Pour le premier passage, 618 clichés, offrant une résolution spatiale de 0,001 m/pixel, ont été réalisés avec une focale fixe de 20/f2.8 mm à une altitude de prise de vues de 1,25 mètre. La densité de points obtenue a été de 18 259 points par mètres carrés. Le second passage a été réalisé avec le même dispositif pour une résolution spatiale de 0,0008 m/pixel. Moins de clichés (546) ont été nécessaires du fait du démontage des membrures. La densité de points obtenue est équivalente au premier passage : 18 986 points par mètres carrés. Cette densité est bien inférieure aux résultats obtenus sur les calculs effectués en 2014 sur l'épave Caska 2. Cette différence est liée à l'évolution du logiciel qui permet aujourd'hui l'obtention de nuages de points denses. Cet exemple illustre bien la rapidité de perfectionnement des logiciels. Il est donc primordial de conserver, d'une part, les clichés au format RAW<sup>24</sup> natifs en archive et, d'autre part, l'ensemble des informations utiles à l'élaboration du modèle afin de pouvoir effectuer des calculs *a posteriori*. C'est dans cet objectif que nous lions à ces fichiers une fiche descriptive comportant l'ensemble des paramètres nécessaires à l'élaboration du modèle.

La mise à l'échelle et l'orientation des deux modèles de Zambratija ont été effectuées à partir d'une équerre posée à l'horizontale sur le fond. Le nivellement étant légèrement différent lors des deux passages de prises de vues, un changement d'orientation du modèle a pu être constaté, causant un léger décalage des orthophotos. Cependant, la superposition des modèles 3D reste cohérente. La solution consiste donc à effectuer un premier relevé orienté selon une équerre nivelée qui permet également de géoréférencer un nombre suffisant de points d'appui : au minimum trois. Ces points serviront de base à l'orientation et la mise à l'échelle des relevés ultérieurs afin de permettre l'extraction d'orthophotographies superposables.

24 Le fichier RAW est un fichier brut de traitement généré par l'appareil photo contenant l'ensemble des données concernant le boîtier et le capteur, ainsi que les données de prise de vue.

Dans le cadre des études d'archéologie navale, l'objectif est de constituer une documentation normalisée traduisant les dimensions, la forme et les caractéristiques structurales du sujet étudié. Cette documentation peut se décliner en 2D ou en 3D. Le dessin technique 2D – planimétries, sections transversales et longitudinales – avec ses conventions est actuellement le support privilégié pour l'illustration du propos scientifique et pour la comparaison entre épaves étudiées. Par ailleurs, le modèle 3D obtenu grâce au relevé photogrammétrique des vestiges constitue la base à partir de laquelle seront restituées les formes d'origine du navire au moyen de logiciels 3D<sup>25</sup>.

148

Pour les planimétries des vestiges, le support le plus simple à gérer est l'orthophotographie qui peut être générée directement par certains logiciels de photogrammétrie numérique. Pour des raisons techniques et de représentation, les plans des épaves sont en général effectués selon une vue zénithale quel que soit l'angle de gîte des vestiges. Cette représentation permet d'illustrer le processus de formation de l'épave ainsi que la position des vestiges dans leur contexte archéologique et topographique. Cependant, sauf dans le cas d'une épave gisant parfaitement à plat sur le fond marin et sans déformation, la vue zénithale ne correspond pas à une vue perpendiculaire au plan de construction du navire d'origine. Le logiciel de photogrammétrie que nous utilisons permet de choisir le plan de référence pour l'extraction de l'orthophotographie et donc de s'affranchir de l'angle de gîte.

La méthode de mise au net la plus simple consiste à importer ce document dans un logiciel de DAO/CAO<sup>26</sup> et de redessiner l'ensemble des vestiges. Le choix du logiciel peut avoir une importance selon l'objectif recherché. Cependant, aucun ne répondant à l'ensemble des prérogatives, nous préférons commencer par effectuer un premier travail sous un logiciel de CAO, comme *AutoCAD*, afin de profiter du géoréférencement des différentes orthophotos qui nous permettront de superposer les différentes couches d'information de manière automatique et de bénéficier d'outils de dessin performants. Le travail s'effectuant à l'échelle sur des rasters<sup>27</sup> à la résolution millimétrique, le lissage d'éventuelles rigidités des traits liées à l'utilisation de polygones sera effectué lors de la réduction des plans pour les supports de publication. Une organisation raisonnée en calques nous permettra de gérer les différentes couches d'information correspondant aux diverses structures conservées de l'épave et aux multiples types d'assemblages.

25 Comme le logiciel *Rhinocéros* : cf. l'article de P. Poveda dans ce même volume, p. 157-179.

26 Dessin assisté par ordinateur / Conception assistée par ordinateur.

27 Le raster est une image matricielle dont l'espace est divisée en petits rectangles – pixels – auxquels sont associés une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace.

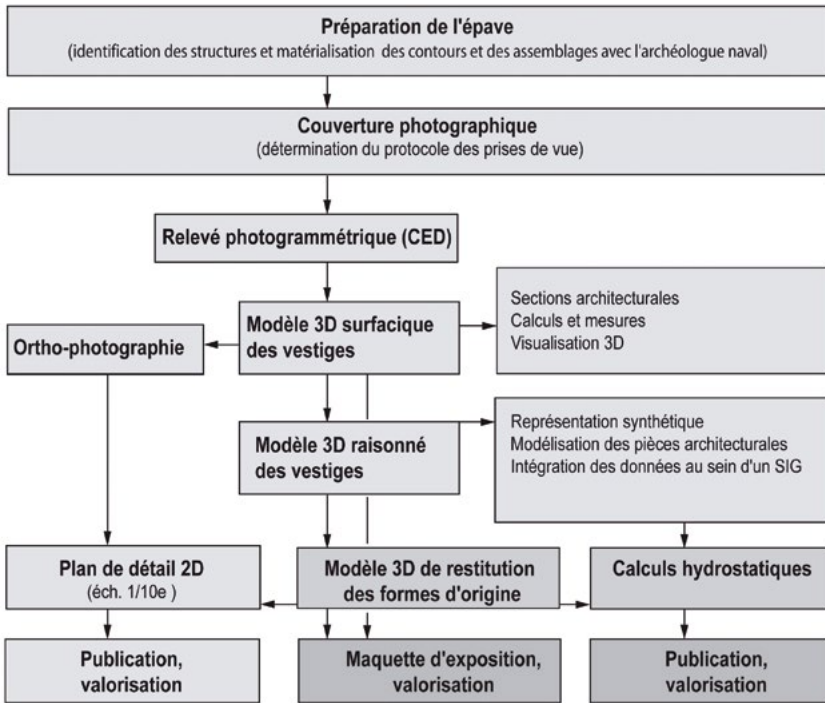


Fig. 15. Schéma montrant la chaîne opératoire partant de l'enregistrement des données, des modèles 3D des vestiges et de restitution, jusqu'à la valorisation.  
Schéma : V. Dumas (CNRS-AMU, CC)

Afin de finaliser le rendu et d'obtenir un résultat plus proche du dessin manuel, le plan est ensuite exporté sous un logiciel de vectorisation basé sur l'utilisation de courbes de Bézier tel qu'*Illustrator*. Ce logiciel, plutôt orienté vers l'édition, permet d'une part d'effectuer l'ensemble des habillages (texte, mise en couleurs, gestion des épaisseurs des traits), d'autre part de gérer aisément la préparation du dessin pour la publication (mises à l'échelle, formats)

Les sections transversales et longitudinales sont réalisées sur la base du modèle tridimensionnel en utilisant un logiciel capable de travailler soit sur la base de nuages de points soit sur celle de maillages polygonaux comme *Rhinocéros*. Ce logiciel est simple d'utilisation et s'intègre dans notre chaîne opératoire qui, à partir des vestiges de l'épave, conduit à la restitution 3D du navire : compatibilité dans la gestion des calques, importation et exportation dans les différents formats de fichiers choisis. Le modèle photogrammétrique maillé et texturé, sorti de *PhotoScan*, est importé au format .wrl ou .obj dans *Rhinocéros*. Les sections sont réalisées puis exportées au format .ai vers *Illustrator* afin d'être complétées par les informations consignées sur les croquis réalisés lors de la phase d'observation durant la campagne de fouille (fig. 16).

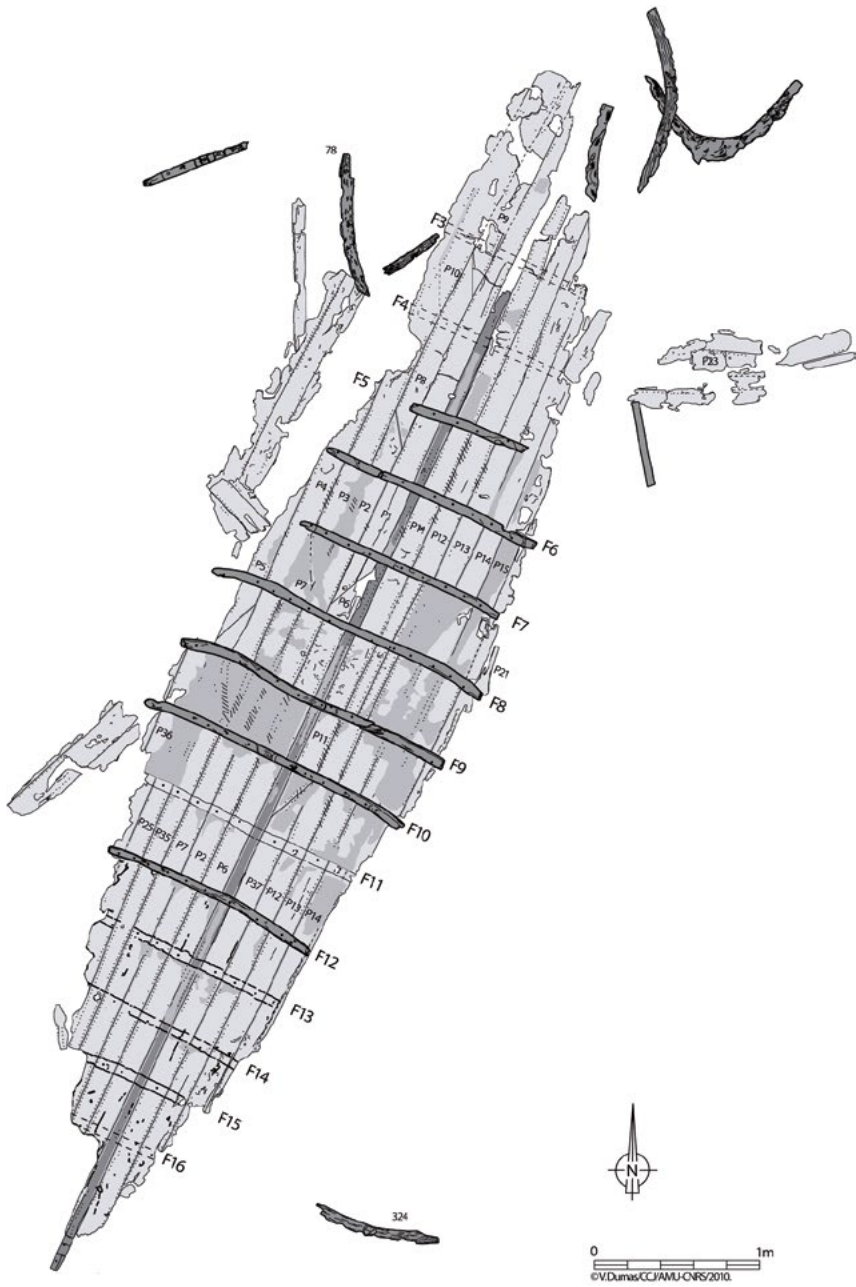


Fig. 16. Planigraphie de l'épave Caska 1; les tons de gris indiquent les diverses structures conservées. Mission franco-croate : UniZd-CCJ. Dessin : V. Dumas (CNRS-AMU, CC)

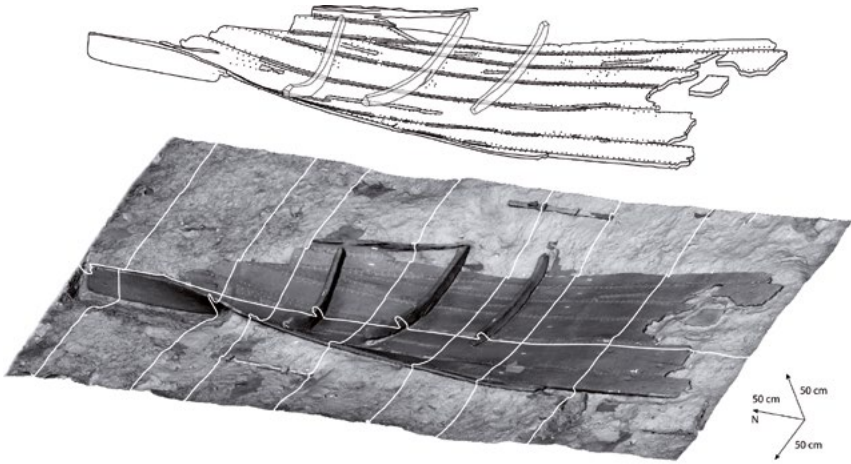


Fig. 17. Modèle 3D des vestiges, localisation des sections et restitution 3D raisonnée de l'épave de Zambratija. Mission franco-croate : AMI-CCJ. Relevé : V. Dumas (CNRS-AMU, CC)

Le modèle 3D maillé et texturé des vestiges issus du travail photogrammétrique est un modèle brut, même si les divers marquages mettant en évidence les caractéristiques des structures conservées sont visibles. La création d'un modèle 3D schématisé des vestiges<sup>28</sup> à l'aide du logiciel *Rhinoceros* est une étape dans le processus de compréhension et de restitution des formes originelles du navire étudié. Chaque pièce – quille, membrures, bordés, éléments d'assemblage – est redessinée séparément à partir du modèle maillé pour devenir un volume à condition d'avoir pu faire l'objet d'un relevé exhaustif, ce qui n'est pas toujours le cas pour certains assemblages complexes en connexion (fig. 17). Cette représentation plus épurée est plus lisible et représente une base de travail et de réflexion.

Cette étape apporte un grand nombre d'informations qu'il était auparavant difficile ou fastidieux d'obtenir. Les opérations de mesure – longueur, largeur, épaisseur – deviennent beaucoup plus précises et simples à effectuer sur ce modèle que sur l'objet d'origine en milieu immergé. L'évaluation des volumes est automatique et les calculs de répartition – par exemple l'espacement des chevilles de blocage des tenons ou des ligatures – peuvent être élargis à l'ensemble des éléments visibles sur le modèle. Toutefois, comme il a été précisé auparavant, cela n'affranchit pas d'un certain nombre d'observations directes.

<sup>28</sup> L'ensemble des pièces conservées est redessiné en suivant les lignes caractéristiques visibles sur le modèle 3D maillé.

Les choix scientifiques des divers programmes de recherche peuvent impliquer le démontage et l'extraction totale ou partielle de l'épave pour la réalisation d'un traitement de conservation. Cette éventualité peut porter à la réalisation d'importants compléments d'observations sur les vestiges – analyses de faces cachées, d'assemblages complexes – suivis de relevés généraux et de détail. Pour le relevé de pièces détachées, une méthode communément utilisée consiste à effectuer un dessin à l'échelle sur un support transparent – film en plastique épais ou en acétate – mais, selon la dextérité du dessinateur ou le type de support choisi, un certain nombre de déformations sont possibles. Le film transparent peut également être fixé sur une vitre disposée parallèlement au plan à relever (fig. 18). Selon la complexité de la pièce à reproduire, des problèmes de parallaxe peuvent se présenter. L'utilisation d'un pointeur laser fixé au feutre permet de réduire ce phénomène<sup>29</sup>.

152

Une évolution de cette méthode de dessin direct a conduit à l'utilisation de bras articulés de mesures munis de palpeurs permettant un relevé 3D des contours de l'objet et de ses lignes caractéristiques : assemblages, traces d'outils, cassures<sup>30</sup>. Pour une meilleure manœuvrabilité et une plus grande amplitude, l'utilisation de systèmes de palpation portables libérés du bras articulé est une évolution en terme d'ergonomie et de précision<sup>31</sup>. Au final, l'atout de cet ensemble de systèmes de relevé direct est de fournir des représentations interprétées de l'objet. Cependant ces systèmes de mesure destinés à des environnements protégés, restent fragiles et moyennement adaptés aux conditions difficiles rencontrées sur nos opérations – bois gorgés d'eau, poussière. Une méthode alternative peut être l'utilisation de moyens d'acquisition 3D indirecte – lasergrammétrie ou photogrammétrie –, mais, afin d'effectuer un relevé complet de l'ensemble des faces des pièces, au minimum deux relevés du même objet sont nécessaires. Ces deux relevés doivent être assemblés afin d'obtenir un modèle 3D brut texturé. Le dessin interprétatif est réalisé *a posteriori* sous *Rhinocéros*.

29 George Indruszewski, « Ship planks with treenail fastenings from Lund, Scania/Skane », dans *Maritime Archaeology Newsletter from Roskilde Denmark*, n° 14, 2000, p.62-63.

30 Morten Ravn, Vibeke Bischoff, Anton Englert, Søren Nielsen, « Recent Advances in Post-Excavation Documentation, Reconstruction, and Experimental Maritime Archaeology », dans Alexis Catsambis, Ben Ford, Donny L. Hamilton (dir.), *The Oxford Handbook of Maritime Archaeology*, Oxford, Oxford University Press, 2011, p. 232-249 ; Ufuk Kocabaş, « The Latest Link in the Long Tradition of Maritime Archaeology in Turkey: The Yenikapi Shipwrecks », *European Journal of Archaeology*, n° 15, 1, 2012, p. 1-15.

31 Nicolas Ranchin, « Méthodologie de relevé 3D », dans Sabrina Marlier (dir.), *Arles-Rhône 3, Un chaland gallo-romain du 1<sup>er</sup> siècle apr. J.-C.*, *Archaeonautica*, n° 18, 2014, p. 58-60 ; Sabrina Marlier, Pierre Poveda, Nicolas Ranchin, « The Arles-Rhône 3 project: from the excavation and raising of a Gallo-Roman barge, in the southern coastal French city of Arles, to its documentation and modelling in 3D (2011-2012) », dans *Proceedings of the 13th International Symposium on Boat and Ship Archaeology*, Amsterdam, 2012, à paraître.





Fig. 18. Relevé à l'échelle d'un banc de nage découvert sur le fond de cale de Caska 2. Mission franco-croate : UniZd-CC). Cliché : Ph. Groscaux (CNRS-AMU, CC)

Les bois gorgés d'eau, une fois sortis de celle-ci, ont tendance à se déformer et à bouger selon les variations de leur taux d'humidité et leur degré de dégradation. La présence de fractures, les dimensions des pièces et leur éventuelle courbure accentuent le risque d'altération. L'extrême précision des modèles obtenus pour chaque face des pièces ne permet pas aux logiciels d'effectuer leur recollement cohérent, c'est-à-dire l'assemblage des nuages de points ou de surfaces 3D,

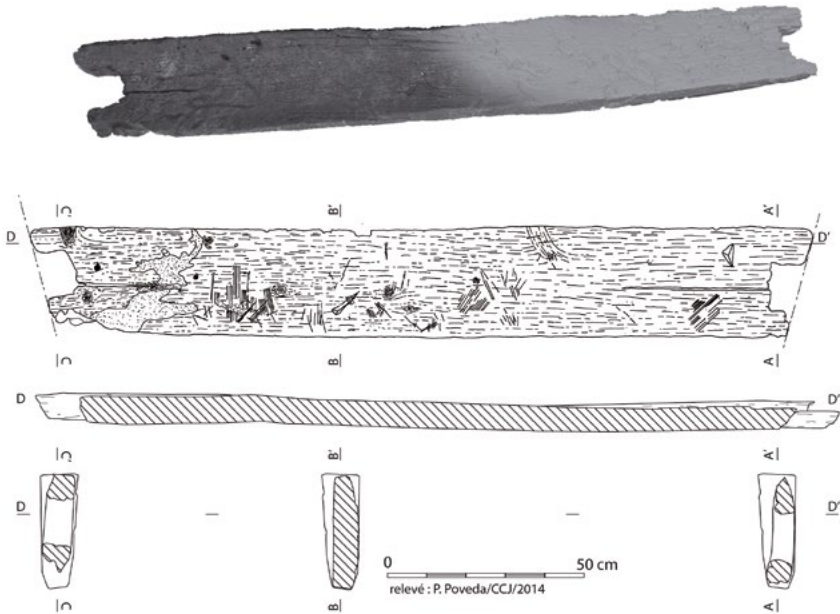


Fig. 19. Relevé photogrammétrique (en haut) et relevé à l'échelle du banc de nage.  
Mission franco-croate : UniZd-CCJ. Photogrammétrie : V. Dumas, Ph. Groscaux ;  
Dessin : P. Poveda (CNRS-AMU, CCJ)

car les géométries subissent des modifications selon plusieurs axes. Les objets compacts des épaves Caska 2 ou de Zambratija n'ont effectivement pas posé de problème. En revanche, les pièces architecturales plus complexes et fracturées ont fait apparaître des difficultés d'assemblage.

Si le but est d'effectuer une représentation normalisée en 2D (fig. 19), l'objet pourra être numérisé en deux fois et chacun des deux modèles sera traité comme un sujet différent, les imperfections disparaissant lors de la réduction au format de publication. Si l'on souhaite obtenir une représentation 3D, il faudra poser la pièce à modéliser sur un support permettant de réduire autant que possible les zones cachées et d'effectuer la modélisation en une seule fois. Cette opération aura l'avantage de réduire les manipulations – et donc les risques de rupture –, d'optimiser le temps global d'acquisition et de post-traitement tout en obtenant une meilleure précision.

Une dernière remarque s'impose pour ce qui concerne le relevé des traces de façonnage. Le niveau de détail obtenu sur le modèle 3D permet au dessinateur de rendre compte aisément de l'ensemble de ces marques. Cependant, le dessin interprété s'effectuant *a posteriori* loin de l'objet d'origine, le recours à des photos de détails, des croquis et des notes est fondamental pour correctement interpréter l'objet. L'utilisation de méthodes spécifiques de marquage avant le

relevé photogrammétrique, par exemple l'utilisation de craie pour mettre en évidence les traces d'outillage, semble être une bonne solution pour rendre la lecture des modèles 3D et donc leur interprétation plus aisées<sup>32</sup>.

Pour conclure, l'utilisation de la photogrammétrie numérique et des autres procédés d'acquisition 3D peut être considérée comme une évolution majeure des méthodes de relevés. Cette évolution a conduit à une adaptation de la chaîne opératoire sur le terrain et à la restitution des données selon la normalisation graphique en vigueur en archéologie navale. Elle implique également le développement d'un travail de rétro-conception en traitant les modèles 3D – nuage de points ou maillage – par des fonctions CAO<sup>33</sup> afin de reconstruire séparément les éléments constitutifs de l'épave – quille, bordé, membrure – sous la forme de modèles paramétriques. Dans la chaîne opératoire, cette étape nécessite une harmonisation des méthodes de travail et une normalisation des modèles 3D obtenus afin de pouvoir en extraire des modèles théoriques – maquette virtuelle – exploitables scientifiquement.

Ce travail sur les éléments constitutifs de l'épave ne doit pas nous faire oublier que tout navire est conçu comme une structure flottante complexe et organisée spatialement – proue, poupe, tribord, bâbord, bordé, vaigrage... Le positionnement des pièces les unes par rapport aux autres doit donc également être pris en compte lors de l'élaboration du modèle 3D de chacune d'elles afin de pouvoir exploiter le potentiel offert par les systèmes d'information géographique, que ce soit en tant que support de gestion documentaire mais également comme outil de traitement et de création de données. Cette approche doit être appréhendée dans sa globalité, ce qui nous permettra de profiter pleinement des technologies actuelles et futures.

#### BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE

BASS Georges F., VAN DOORNINCK JR. Frederick, *Yassi Ada. A Seventh-Century Byzantine Shipwreck*, College Station, Texas A&M University Press, 1982.

BLAUSTEIN Maurice, HESNARD Antoinette, « Annexe 1 – Photogrammétrie, technique de prise de vue et précision de la restitution », dans Antoinette Hesnard, Marie-Brigitte Carre, Michel Rival, Bernard Dangréaux, « L'épave romaine Grand Ribaud D (Hyères, Var) », *Archaeonautica*, n° 8, 1988, p. 157-164.

32 Béat Arnold, Fabien Langenegger, *Plateau de Bevaix, 8, Bevaix-Sud : plongée dans le passé, fouille subaquatique d'un village du Bronze final*, Hauterive, Office et musée cantonal d'archéologie de Neuchâtel, coll. Archéologie neuchâteloise, 50, fig. 45<sup>e</sup>, 2012, p. 58.

33 Les fonctions CAO sont liées à l'utilisation de logiciels de Conception Assistée par Ordinateur permettant de modéliser géométriquement et de tester virtuellement une pièce ou un ensemble de pièces.

- BOETTO Giulia, KONCANI UHAC Ida et UHAC Marko, « Navires de l'âge du Bronze à l'époque romaine en Istrie » dans Patrice Pomey (dir.), « Ports et navires dans l'Antiquité et à l'époque byzantine », *Dossiers d'Archéologie*, n° 364, Juillet-Août, 2014, p. 22-25.
- CARLSON Deborah N., « A monumental Cargo: The Roman Column Werck at Kizilburun, Turkey », *The INA Quarterly*, n° 3, 1, 2006, p. 3-9.
- DEMESTICHA Stella, SKARLATOS Dimitrios, NEOPHYTOU Andonis, « The 4th-century B.C. shipwreck at Mazotos, Cyprus: New techniques and methodologies in the 3D mapping of shipwreck excavations », *Journal of Field Archaeology*, n° 39, 2, 2014, p. 134-150.
- DRAP Pierre, « Archéologie sous-marine : relevé et réalité virtuelle pour l'étude des sites inaccessibles », *Archéologia e Calcolatori*, suppl. n° 3, 2012, p. 427-439.
- DRAP Pierre, LONG Luc, « Photogrammétrie et archéologie sous-marine profonde. Le cas de l'épave étrusque Grand Ribaud F », *Revue XYZ*, n° 104, 3, 2005, p. 25-34.
- GIANFROTTA Piero Alfredo, POMEY Patrice, *Archeologia Subacquea, storia, tecniche, scoperte e relitti*, Milan, Mondadori, 1981.
- GREEN Jeremy, « Hull recording methods used at Monbasa », *The INA Quarterly*, n° 18, 2, 1991, p. 8-13.
- GREEN Jeremy, MATTHEWS Sheila, TURANLI Tufan, « Underwater archaeological surveying using PhotoModeler VirtualMapper: different applications for different problems », *IntJNautA*, n° 31, 2, 2002, p. 283-292.
- HIGGINS Courtney R., « Learning How to Map a 70-Ton Ship », *The INA Quarterly*, n° 34, 1, 2007, p. 11-12.
- HULO Jean François, « Acquisition de nuages de points denses par photogrammétrie terrestre. Application à la mission d'archéologie de Kilwa, Ababie Saoudite », *Revue XYZ*, n° 122, 1, 2010, p. 19-26.
- LIU Bernard, « Recherches archéologiques sous-marines », *Gallia*, n° 31, 1973, p. 71-608.

#### LOGICIELS

<http://logiciels.ign.fr/?-Micmac,3>

<http://www.123dapp.com/catch>

<http://www.photomodeler.com/>

<http://www.agisoft.ru/>

## HISTOIRE MARITIME

collection dirigée par Olivier Chaline

Vous pouvez retrouver à tout moment l'ensemble des ouvrages  
parus dans la collection « Histoire maritime »  
sur le site internet de Sorbonne Université Presses :

<https://sup.sorbonne-universite.fr/>

*La Real Armada*

*La Marine des Bourbons d'Espagne au XVIII<sup>e</sup> siècle*

Olivier Chaline & Augustin Guimerá Ravina

*Les Marines de la guerre d'Indépendance américaine*

1763-1783

tome I. *L'Instrument naval*

tome II. *L'Opérationnel naval*

Olivier Chaline, Philippe Bonnichon & Charles-Philippe de Vergennes (dir.)

*La Maritimisation du monde*

*de la préhistoire à nos jours*

GIS d'histoire maritime

*L'Approvisionnement des villes portuaires en Europe*

*du XVI<sup>e</sup> siècle à nos jours*

Caroline Le Mao & Philippe Meyzie (dir.)

*La Naissance d'une thalocratie*

*Les Pays-Bas et la mer à l'aube du Siècle d'or*

Louis Sicking

*La Piraterie au fil de l'histoire*

*Un défi pour l'État*

Michèle Battesti (dir.)

*Le Voyage aux terres australes du commandant Nicolas Baudin*

*Genèse et préambule*

1798-1800

Michel Jangoux

*Les Ports du golfe de Gascogne*

*De Concarneau à la Corogne*

XV<sup>e</sup>-XXI<sup>e</sup>

Alexandre Fernandez & Bruno Marnot (dir.)

*Les Grands Ports de commerce français et la mondialisation*

*au XIX<sup>e</sup> siècle*

Bruno Marnot

*Les Huguenots et l'Atlantique*  
*Pour Dieu, la Cause ou les Affaires*  
Mickaël Augeron, Didier Poton et Bertrand van Ruymbeke (dir.)  
Préface de Jean-Pierre Poussou

*Négociants et marchands de Bordeaux*  
*De la guerre d'Amérique à la Restauration*  
1780-1830

Philippe Gardey  
Préface de Jean-Pierre Poussou

*La Compagnie du Canal de Suez*  
*Une concession française en Égypte*  
1888-1956

Caroline Piquet

*Les Villes balnéaires d'Europe occidentale*  
*du XVIII<sup>e</sup> siècle à nos jours*  
Yves Perret-Gentil, Alain Lottin & Jean-Pierre Poussou (dir.)

*La France et l'Indépendance américaine*  
Olivier Chaline, Philippe Bonnichon & Charles-Philippe de Vergennes (dir.)

*Les Messageries maritimes*  
*L'essor d'une grande compagnie de navigation française*  
1851-1894

Marie-Françoise Berneron-Couvenhes

*Canadiens en Guyane*  
1745-1805

Robert Larin

Prix de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer, 2006

*La Mer, la France et l'Amérique latine*  
Christian Buchet & Michel Vergé-Franceschi (dir.)

*Sous la mer*  
*Le sixième continent*  
Christian Buchet (dir.)

*Les Galères au musée de la Marine*  
*Voyage à travers le monde particulier des galères*  
Renée Burlet

*La Grande Maîtresse, nef de François I<sup>er</sup>*  
*Recherches et documents d'archives*  
Max Guérout & Bernard Liou

*À la mer comme au ciel*  
*Beautemps-Beaupré et la naissance de l'hydrographie moderne*  
*L'émergence de la précision en navigation et dans la cartographie marine*

1700-1850

Olivier Chapuis

Prix de l'Académie de marine, 2000

Grand prix de la Mer décerné par l'association  
des écrivains de langue française, 2000

*Les Marines de guerre européennes*

XVII<sup>e</sup>-XVIII<sup>e</sup> siècles

Martine Acerra, José Merino & Jean Meyer (dir.)

*Six millénaires d'histoire des ancres*

Jacques Gay

*Coligny, les protestants et la mer*

1558-1626

Martine Acerra & Guy Martinière (dir.)

« BIBLIOTHÈQUE DE LA REVUE D'HISTOIRE MARITIME »

*La Vie et les travaux du chevalier Jean-Charles de Borda (1733-1799).*

*Épisode de la vie scientifique du XVII<sup>e</sup> siècle*

Jean Mascart

# REVUE D'HISTOIRE MARITIME

Dirigée par Olivier Chaline & Sylviane Llinares

28. *Sortir de la guerre sur mer*
27. *Mer et techniques*
26. *Financer l'entreprise maritime*
25. *Le Navire à la mer*
24. *Gestion et exploitation des ressources marines de l'époque moderne à nos jours*
- 22-23. *L'Économie de la guerre navale, de l'Antiquité au XX<sup>e</sup> siècle*
21. *Les Nouveaux Enjeux de l'archéologie sous-marine*
20. *La Marine nationale et la première guerre mondiale: une histoire à redécouvrir*
19. *Les Amirautés en France et outre-mer du Moyen Âge au début du XIX<sup>e</sup> siècle*
18. *Travail et travailleurs maritimes (XVIII<sup>e</sup>-XX<sup>e</sup> siècle). Du métier aux représentations*
17. *Course, piraterie et économies littorales (XV<sup>e</sup>-XXI<sup>e</sup> siècle)*
16. *La Puissance navale*
15. *Pêches et pêcheries en Europe occidentale du Moyen Âge à nos jours*
14. *Marine, État et Politique*
13. *La Méditerranée dans les circulations atlantiques au XVIII<sup>e</sup> siècle*
12. *Stratégies navales: l'exemple de l'océan Indien et le rôle des amiraux*
- 10-11. *La Recherche internationale en histoire maritime: essai d'évaluation*
9. *Risque, sécurité et sécurisation maritimes depuis le Moyen Âge*
8. *Histoire du cabotage européen aux XVI<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles*
7. *Les Constructions navales dans l'histoire*
6. *Les Français dans le Pacifique*
5. *La Marine marchande française de 1850 à 2000*
4. *Rivalités maritimes européennes (XVI<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècle)*
- 2-3. *L'Histoire maritime à l'Époque moderne*
1. *La Percée de l'Europe sur les océans vers 1690-vers 1790*





revue dirigée par

Olivier Chaline, Gérard Le Bouëdec & Jean-Pierre Poussou

## *Les nouveaux enjeux de l'archéologie sous-marine*

Ce numéro, très richement illustré, présente un dossier intitulé « Les nouveaux enjeux de l'archéologie maritime », dont les découvertes apportent beaucoup : comment, par exemple, ne pas être sensible aux conséquences du débarquement allié de 1944 ? C'est une discipline très proche de l'histoire par ses centres d'intérêt mais également très différente par ses démarches et parfois par son vocabulaire : un glossaire d'archéologie marine et sous-marine très fourni figure donc dans ce numéro.

Ce dossier est d'abord centré sur « les nouvelles problématiques de la recherche archéologique sous-marine », autour de l'étude des changements côtiers d'un côté, de la prospection et de l'étude des épaves à grande profondeur de l'autre. À partir du chantier-laboratoire du vaisseau *La Lune*, qui appartenait à la première Marine de Louis XIV, Michel L'Hour retrace les étapes de la conquête des abysses par les archéologues sous-marins français. Les technologies utilisées sont étudiées plus en détail dans la seconde partie du dossier, notamment la photogrammétrie numérique, la réalisation des modèles numériques et plus généralement toutes les possibilités apportées par l'informatique. Enfin, le dossier s'attache à montrer ce que peut apporter la valorisation de la recherche sous-marine, notamment grâce à une recherche aux résultats spectaculaires de Jerzy Gawronski, qui étudie la cargaison et les structures de l'*Amsterdam*, vaisseau hollandais qui s'échoua en 1749 ; ses recherches débouchent en effet sur l'économie et « la production urbaine » de la ville d'Amsterdam à cette époque.

Le caractère novateur du dossier est tout aussi évident grâce aux présentations de leurs recherches par sept doctorants, dont les thèses sont en cours, et par le contenu des *varia*. Dans le premier cas, on voit à la fois la diversité des sujets retenus puisque nous allons de l'archéologie côtière à l'utilisation des *U-Boot-Bunker* construits par les Allemands dans nos villes portuaires, en passant par la présence russe dans le Pacifique Sud au tout début du XIX<sup>e</sup> siècle. Les problèmes actuels attireront l'attention sur le conflit franco-anglais en mer d'Oman à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Beaucoup de lecteurs, par ailleurs, seront tout à fait intéressés par les conditions de la recreation de l'École navale au lendemain de la Seconde Guerre mondiale.

Le numéro rappelle enfin l'œuvre de deux très grands historiens du maritime : Jean Boudriot et Paul Butel.

