

Le projet ROV 3D : relevé sous-marin en grande profondeur par photogrammétrie.

Applications à l'archéologie sous-marine.

■ Pierre DRAP - Julien SEINTURIER - Bilal HIJAZI - Djamal MERAD - Jean-Marc BOI - Bertrand CHEMISKY - Emmanuelle SEGUIN - Luc LONG

Nous présentons ici une approche du relevé sous-marin à grande profondeur, par ROV, fondée sur la photogrammétrie. Une technique hybride nous permet d'obtenir des résultats en temps réel, suffisants pour guider le ROV depuis le navire de surface, assurer une couverture homogène du site, et enregistrer sur un ordinateur embarqué les images à haute résolution qui permettront un relevé en temps différé d'une précision millimétrique. L'opération de mesure est totalement sans contact et non invasive. Le temps d'immobilisation du site est minimal, et correspond au temps de survol. Les prises de vues sont synchronisées à 10Hz, deux heures de survol ont ainsi été nécessaires pour réaliser l'expérience présentée dans cet article : le relevé de l'épave Romaine Cap Bénat 4, par 328 mètres de fond. L'approche présentée dans ce papier a été développée dans le cadre du projet ROV 3D. Financé par le FUI pour trois ans, ce projet associe deux industriels et un laboratoire de recherche. La COMEX, COMpanie Maritime d'Expertise, a coordonné ce projet.

MOTS-CLÉS

Archéologie sous-marine, photogrammétrie sous-marine, odométrie, orientation temps-réel, modèle 3D haute résolution

tées par un ordinateur, le tout embarqué sur un ROV. Un éclairage adéquat par LED assure une illumination correcte de la scène. La fréquence élevée des prises de vues assure une couverture exhaustive, et l'échelle importante de ces prises de vues confère au résultat une très grande précision.

Le système ainsi déployé est totalement sans contact, non destructif et de très haute précision. Une communication avec le navire de surface autorise un calcul 3D temps réel de la zone observée par le ROV, ce qui permet ainsi un guidage optimal du ROV sur site, et assure au pilote du ROV la complétude du relevé lors de la remontée à bord de l'engin.

Le relevé photogrammétrique dans le contexte sous-marin permet d'obtenir, sans contact, un relevé exhaustif de toutes les parties visibles du site, dans un minimum de temps et avec une grande précision. Cette approche offre au spécialiste comme au grand public une vision globale du site que la turbidité du milieu marin interdit habituellement (Drap et al., 2013).

■ Les acteurs et le projet ROV3D

Le projet ROV 3D, labellisé par le pôle de compétitivité "Mer PACA", a été partiellement financé pour une période de trois ans, dans le cadre du "Fonds Unique Interministériel" (FUI). Le ministère français de l'Industrie, la fondation européenne "FEDER", la région PACA, le Conseil Général des Bouches-du-Rhône et Marseille Provence Métropole ont participé à ce financement.

Le consortium se compose d'un laboratoire de recherche universitaire, le

Introduction

■ Le contexte

Si elles sont hors de portée des plongeurs, par conséquent des pilleurs, les épaves profondes échappent aussi à l'action des scientifiques (au-delà de 50 m, la plongée traditionnelle à l'air est interdite et l'on doit recourir à l'utilisation de mélanges gazeux nécessitant d'importants moyens en surface). Ces épaves profondes sont également protégées par divers facteurs physico-chimiques naturels, de par leur position en pleine mer. L'obscurité, une température basse et un faible taux d'oxygène participent d'une préservation exceptionnelle de ces épaves.

Cependant, même ces sites profonds sont maintenant menacés par les nouveaux types de chalutages qui détruisent la couche de surface des sites et brouillent leur lisibilité. En effet, la

protection que leur profondeur pouvait leur accorder n'est plus d'actualité : les chaluts peuvent aujourd'hui être déployés jusqu'à -1000 m. Par conséquent, beaucoup de ces épaves sont susceptibles d'être détruites avant même de pouvoir être étudiées, voire de pouvoir être observées.

Indépendamment de l'accessibilité par les plongeurs, un site sous-marin est hors de portée physique et pratique pour la majorité des archéologues, des biologistes marins ou des experts des domaines étudiés (géologues, industriels). Il est donc important, voire crucial, d'adopter des techniques qui peuvent être aisément mises en place, permettant de relever précisément ces sites sous-marins profonds. C'est ce que nous présentons dans cet article. La technique employée ici est la photogrammétrie. Trois caméras haute résolution sont synchronisées et pilo-



LSIS (Unité Mixte de Recherche CNRS 7296) et de deux partenaires industriels, la COMEX et la SETP. COMEX, Compagnie Maritime d'Expertise, est spécialisée dans les opérations sous-marines de haute technologie, et la SETP dans le contrôle dimensionnel par voie optique. En marge de ce partenariat, le DRASSM (Département des Recherches archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines), a plus ponctuellement joué le rôle de partenaire scientifique et institutionnel dans le cadre de l'intervention sur l'épave Cap Bénat 4.

L'objectif du projet est le développement de procédures automatisées de relevé 3D, dédiées au milieu sous-marin, à l'aide de capteurs acoustiques et optiques. Le capteur acoustique permet l'acquisition d'une grande quantité de données à faible résolution, tandis que le capteur optique (utilisé à grande échelle) permet le relevé de surfaces plus restreintes mais à haute résolution. Grâce à la fusion de ces deux sources de données, nous obtenons des restitutions de grandes scènes complexes, sans se limiter à des structures traditionnelles d'élévation de terrain de type DTM.

Ces relevés complexes, grottes, surplombs, peuvent également concerner des sites archéologiques, des sites industriels, ou l'évolution des paysages dans le temps.

La capacité de mesurer et de modéliser les grands sites sous-marins, dans un court laps de temps, apporte de nouvelles perspectives à l'archéologie sous-marine, à la biologie marine ainsi qu'à l'industrie sous-marine (off-shore, industrie portuaire, etc.) (Drap, Merad, Boï, et al., 2014 ; Drap, Merad, Mahiddine, et al., 2014).

Cet article traite principalement des relevés optiques automatisés, développés et intégrés sur le sous-marin Remora 2000, ainsi que sur le ROV Apache opérés par COMEX. En utilisant le sous-marin, il est possible d'embarquer un spécialiste du domaine afin de lui offrir une vision plus immersive du site, et d'être en mesure de choisir la zone la plus pertinente à étudier. La mise en œuvre du système à partir d'un ROV offre quant à elle une solution plus

légère et plus rapide, autorisant un relevé en deux heures de plongée. Les deux approches sont présentées dans ce document.

L'état de l'art

■ Un bref historique

Sans aucun doute, l'initiateur de la photogrammétrie archéologique sous-marine fut l'archéologue G.-F. Bass, en 1963, sur l'épave byzantine Yassi Ada 2, près de Bodrum, en Turquie (Bass, 1970). Tandis que la National Geographic Society finançait son opération, il procéda à des prises de vues stéréoscopiques depuis le sous-marin Ashera, mis à sa disposition par l'University of Pennsylvania Museum. Si la profondeur du site n'était pas très importante (35 m), le procédé s'avéra cependant très efficace pour collecter en un temps très court un maximum d'informations (Bass, 1970 ; Bass & Rosencrantz, 1973).

Au-delà de la simple mosaïque photographique, qui donne une vision globale à plat d'un site, en ajustant les clichés entre eux, la stéréophotogrammétrie constituait le seul système capable de mesurer une épave et de modéliser en 3D la couche supérieure de sa cargaison.

Peu de temps après les premières expérimentations de Georges Bass sur Yassi Ada 2, Joseph Pollio, effectuée avec le Naval Oceanographic Office (Washington), une carte topographique sous-marine par photogrammétrie. Ses relevés se déroulent en Floride, entre mars 1967 et juin 1968, à partir successivement des submersibles Pegasus, Star III et Aluminaut. Le principal problème est alors de maintenir une hauteur des prises de vues constante (Pollio, 1968). D'autres expériences de ce type auront lieu, mettant en jeu les concepts de base que nous utilisons encore aujourd'hui (Ciani, Hunter, Dowling, & Brunk, 1971 ; Faig, 1979 ; Hoehle, 1971 ; Pollio, 1971).

Au même moment, dans le cadre de la plongée autonome, vont avoir lieu en France, à partir de 1968 et plus généralement dans les années 1970, des relevés stéréophotogrammétriques sur différentes épaves accessibles à

l'homme. D'abord à Marseille, André Tchernia développe entre 1968 et 1971 un cadre métallique de prises de vues stéréoscopiques sur l'épave Planier 3, par 30 m de fond (Liou, 1973). Doté d'un pont roulant pour déplacer la platine photographique, cet outil est perfectionné ensuite par Jean-Pierre Négrel et Nicolas Clerc sur l'épave Pointe de la Luque, à 28 m de fond (Négrel & Clerc, 1973). Ces avancées vont rapidement se concrétiser avec succès sur la fouille de la Madrague de Giens, par 20 m de fond. Devenu une référence mondiale, ce chantier école du CNRS, mené sous la houlette d'Antoinette Hesnard, André Tchernia et Patrice Pomey, servira durant dix ans de terrain d'expérimentation pour les relevés archéologiques (Tchernia, Pomey, & Hesnard, 1978).

Au demeurant, dans l'archipel de Marseille comme sur la Madrague de Giens, les prises de vues photogrammétriques étaient toujours soumises à des contraintes géométriques fortes, notamment la stéréoscopie qui imposait des axes optiques parallèles, se traduisant toujours inévitablement par la mise en place de structures métalliques fixes et coulissantes afin de guider les photographes. Ces appareillages, lourds, encombrants et longs à mettre en œuvre, nécessitaient une équipe de plongeurs bien entraînés et, par conséquent, limitaient la profondeur d'utilisation. Ils ont représenté un frein important en ce domaine durant des années.

Le système va s'alléger à partir de 1984, lors de la fouille que mène A. Hesnard sur l'épave dolière Grand Ribaud D, par 18 m de fond. Après un marquage du terrain par de nombreuses cibles, une chambre métrique Sapho (COMEX), en flottabilité nulle, se déplace cette fois le long d'un guide constitué d'un simple tube en PVC de 12 m de long, positionné perpendiculairement à deux barres transversales de 16 m de long, elles aussi en PVC. Le système est léger, maintenu en position constante par des forces antagonistes générées par des lests et des flotteurs (Hesnard, 1989).

En 1984 et 1985, ce procédé va se simplifier encore davantage sur la fouille de l'épave de blocs de calcaire de Carry-le-Rouet, sous conduite de L. Long





(DRASSM) et par 6 m de fond. Deux Hasselblad semi-métriques, équipés d'objectifs grand angles de 38 mm, sont cette fois fixés sur une petite platine hydrodynamique, d'abord en aluminium, puis en plastique, qui progresse à hauteur constante au-dessus des blocs de pierre. La hauteur est la même d'un couple à l'autre grâce, d'une part, à l'utilisation de bouées en surface, et, d'autre part, au fil nylon qui rattache au sol la platine photo sur un triangle métallique. Ce dernier est déplacé par plongeur et mis de niveau après chaque prise de vue, le long d'une corde à piano de référence (Long, 1986). Dans les deux cas, sur le Grand Ribaud D comme à Carry-le-Rouet, la société SETP (Salon-de-Provence) procède à la restitution des clichés sous forme de plans topométriques, avec points côtés et courbes de niveaux.

Durant les années 1980, ce système va s'exporter sur plusieurs épaves fouillées par le DRASSM à faible profondeur. Ce sera d'abord le cas en 1985 sur l'épave antique de Ploumanac'h, par 5 m de fond, puis sur l'épave Pointe Lequin 2, dans les îles d'Hyères, et enfin en 1986 sur le vaisseau postmédiéval hollandais Mauritius (Gabon), par 10 m de fond.

■ *Photogrammétrie et épaves profondes*

En 1987, inspirée des captures stéréoscopiques réalisées précédemment sur des épaves par petit fond, une plongée avec le sous-marin Nérée 201 autorise un relevé manuel de l'épave romaine des Basses de Can (Saint-Tropez), sise sur la pente entre 70 et 200 m de fond. Cependant, si le champ d'amphores est calibré au moyen de règles graduées et de mires altimétriques, la photogrammétrie est d'emblée disqualifiée pour une question financière : son coût à la restitution. L'archéologue limite donc l'expérience à un relevé graphique plus ou moins précis à 50 cm près, fondé sur les enregistrements vidéo et sur les photographies verticales (Long, 1988). Dans le même temps, l'état des besoins pour l'avenir de l'archéologie sous-marine profonde donnera lieu à de premières réflexions (Tchernia & Pomey, 1990). Mais un saut qualitatif sera franchi en 1993 lors du relevé photogrammétrique de

l'épave profonde Plage d'Arles 4, à 700 m de fond, que supervisent L. Long (DRASSM) et M. Blaustein (SETP), avec le support de l'IFREMER. La couverture stéréophotogrammétrique sera opérée au moyen d'appareils photo moyen format, semi-métriques (Long, 1995). Si les prises de vues furent réalisées en 4 jours sur l'épave romaine Plage d'Arles 4 (20 m x 10 m), une seule journée a suffi dans la foulée, pour couvrir l'épave du vaisseau La Lune, coulé en 1664 à l'est de Toulon, par 90 m de fond (Long & Illouze, 2002).

C'est ensuite en 1996, que la méthode est perfectionnée, en Baie de Marseille, sur l'épave romaine Sud-Caveaux 1, par 64 m de fond, au moyen du ROV Super-Achille et du submersible Rémora 2000, dotés d'une chambre métrique argentine (DRASSM, COMEX, SETP). Le relevé fourni par la SETP tient même compte de zones dégagées au ventilateur Blaster, rattachées lors de la restitution 3D à la couche de surface (Long & Delauze, 1996).

Mais la photogrammétrie profonde va à nouveau progresser entre 2000 et 2002, sur l'épave étrusque Grand Ribaud F, par 61 m de fond, notamment grâce à l'irruption en ce domaine des chercheurs du CNRS, notamment P. Drap (MAP-GAMSAU et LSIS), qui a longtemps collaboré à l'origine avec la SETP. En outre, le développement depuis les années 1990 de la micro-informatique et de logiciels de photogrammétrie libérés de la contrainte de la stéréoscopie, en parallèle avec l'émergence d'appareils photographiques numériques, va considérablement démocratiser la photogrammétrie en archéologie et augmenter le degré de précision. Sur l'épave Grand Ribaud F, sont mis à profit, d'une part, des systèmes de prises de vues simplifiés, qui ne fonctionnent plus sur le principe des couples stéréoscopiques indépendants mais par ajustement de faisceaux, et, d'autre part, des outils de photogrammétrie numérique et des systèmes experts pour la génération des données 3D qui sont utilisés dans un second temps. Au préalable, les prises de vues sont opérées sur l'épave étrusque à la fois par des plongeurs et par des engins submersibles, puisque la profondeur

modérée, à la limite de l'intervention à l'air, autorise les deux types d'intervention (Drap & Long, 2001 ; Long, Drap, Gantes, & Rival, 2001)

C'est ce système, amélioré, qui prévaudra lors de l'intervention du projet européen VENUS, en France, au large des calanques de Marseille, sur l'épave Port-Miou C, par 105 m de fond. Préalablement, au cours du même projet, la méthode a été testée en plongée autonome par P. Drap, sur l'épave de Piannosa (Italie), à 35 m de fond, puis sur celle de Sesimbra (Portugal), à 60 m (Chapman, Bale, & Drap, 2008 ; Long & Drap, 2010).

Aujourd'hui, réalisée en une seule journée par une équipe bien entraînée, jusqu'à une profondeur qui peut atteindre 2000 m (limite actuelle des caissons des appareils photographiques pour la configuration utilisée dans le cadre de l'expérimentation présentée ici), les relevés optiques de grande précision — de l'ordre du millimètre — ne nécessitent plus aucune intervention physique sur le site, ni pour la mise à l'échelle ni pour l'orientation absolue sur la verticale.

Cette méthode et ses résultats se distinguent considérablement des récentes opérations menées sur l'épave du vaisseau La Lune, à l'initiative du DRASSM, dont les relevés sont essentiellement de type acoustique, les images n'étant utilisées ensuite que pour draper le modèle de terrain (Gracias et al., 2013).

À l'heure actuelle, dans le domaine du relevé sous-marin à grande profondeur et à haute définition, il n'existe aucun traitement automatique industrialisé. Cependant, quelques entreprises privées proposent des prestations de service en métrologie sous-marine fondées sur des techniques désormais traditionnelles de photogrammétrie rapprochée. Ces offres qui utilisent la reconnaissance automatique de cibles codées et l'ajustement de faisceaux, nécessitent une intervention sur site au moins pour la pose de cibles sur les parties à mesurer ce qui, dans le contexte sous-marin, peut être un grand handicap (Johannessen & Prytz, 2005) (<http://www.parkermaritime.no/services-and-products/subsea-metrology>).

Comme le préconisait il y a trente ans Patrice Pomey, (Pomey, 1985), les épaves



profondes ont toutes les chances d'être mieux conservées que les autres. A cette époque, l'épave Cap Bénat 4, découverte à l'est des îles d'Hyères par l'IFREMER, à 330 m de fond, inaugurerait une longue liste de navires antiques profonds qui ont tous échappé aux récifs destructeurs, lors du naufrage, et atteint le fond sans grand dommage. C'est sur cette épave emblématique que nous nous sommes penchés en novembre 2014 et dont nous présentons ici les premiers résultats.

L'approche proposée

Dans le cadre de l'expérimentation présentée dans cet article, aucun relevé acoustique n'a été effectué sur site car la zone à couvrir — de l'ordre de 20 m sur 15 m — était suffisamment restreinte pour être aisément traitée en photogrammétrie depuis le ROV. De plus une précision millimétrique était nécessaire à une étude archéologique fine. Un relevé multifaisceaux aurait été inapproprié, car ni assez détaillé, ni assez précis.

La solution adoptée est purement photogrammétrique articulée sur deux calculateurs, l'un embarqué sur le ROV avec les caméras et l'éclairage, l'autre en surface dédié aux calculs photogrammétriques, à la visualisation et au pilotage.

Les tâches sont réparties ainsi : l'ordinateur de fond est chargé de piloter les caméras, de sauvegarder les images localement, d'extraire des points homologues sur au moins deux couples consécutifs (en combinant SIFT, SURF et Harris) puis d'envoyer à l'ordinateur de surface les points 2D "matchés" et identifiés sur au moins quatre images. L'ordinateur de surface reçoit donc quant à lui ces points 2D. Connaissant a priori la calibration des caméras sous-marines, paramètres intrinsèques et paramètres extrinsèques relatifs, il assure le calcul du déplacement du ROV, et visualise en temps réel la position du véhicule et les points 3D calculés.

D'un point de vue photogrammétrique, trois problèmes ont dû être affrontés :

- L'orientation temps réel des couples de photographies pris par le ROV à la fréquence de 10Hz, ceci afin de visualiser en temps réel la trajectoire et la

zone mesurée par le ROV. Nous avons développé un ajustement de faisceaux dédié (Suenderhauf, Konoldige, Lacroix, & Protzel, 2005 ; Xue & Su, 2012) ainsi qu'une orientation par bestFit3D sur les points 3D calculés en temps réel.

- La génération d'un nuage de points dense en utilisant les photographies faites sous l'eau, avec des caméras non métriques, grand angle et un hublot loin de la perfection : le calcul de ce nuage dense, s'appuyant sur les travaux de Furukawa (Furukawa & Ponce, 2010) prend en compte la forte distorsion des images et nos développements utilisent directement les images produites par les caméras sans étape de rectification ni de correction de la distorsion.
- Enfin, pour les résultats en haute résolution, la réalisation d'un pont logiciel entre nos structures de données et des logiciels du commerce. Pour l'ajustement de faisceau ainsi que pour la calibration, les logiciels PhotoScan d'Agisoft et Bingo ont été utilisés.

■ L'architecture ROV3D

Le système ROV3D a été conçu en conservant comme objectif une intégration sur un engin téléopéré léger, ce qui sous-entend une optimisation du volume et du poids de l'ensemble.

Une première étape de validation fonctionnelle sur le sous-marin habité Remora 2000 a permis de s'affranchir de la liaison de transfert de données entre l'engin et la surface, puisque

dans cette configuration l'opérateur accède directement à l'Unité d'Acquisition Embarqué (UAE) via une liaison Ethernet haut débit établie entre l'intérieur de la sphère habitée et le système. Cette étape préliminaire a également permis de valider les spécifications d'éclairage requis pour une exposition suffisante des prises de vues.

L'étape suivante a consisté à réunir l'ensemble des composants du système ROV3D dans un support amovible venant se fixer sous l'engin téléopéré. Le système est alimenté en énergie directement par l'engin, et une liaison de données Ethernet est établie avec la surface permettant le contrôle/commande du système, ainsi que la remontée en temps réel des données traitées par le calculateur embarqué.

Ces données sont ensuite exploitées par un ordinateur en surface de façon à déterminer la trajectoire suivie par l'engin en temps réel, et à fournir ainsi au pilote du ROV une aide à la navigation afin de garantir la couverture exhaustive du site à relever.

Les trois caméras qui composent le système sont chacune intégrées dans un caisson étanche indépendant, et synchronisées par un module spécifique dans l'unité d'acquisition embarquée. Le flux de données, qui peut atteindre 20 Go à la minute, est stocké dans l'UAE et traité en temps réel pour fournir les éléments nécessaires au calcul d'odométrie.

L'éclairage, point crucial en photogrammétrie, doit répondre à deux critères :



Figure 1. Le ROV Apache, équipé du système de photogrammétrie, pendant la phase d'acquisition sur l'épave Cap Bénat 4 à 328 mètres de profondeur. Prise de vue réalisée depuis le ROV Super Achille.

homogénéité d'exposition sur chaque image et constance entre images. Pour répondre à ces contraintes, un système fondé sur la technologie LED est contrôlé depuis l'unité d'acquisition embarquée.

La photogrammétrie

Pour assurer une couverture exhaustive par le ROV de la zone étudiée, la connaissance en temps réel de son déplacement est cruciale. Puisque une transformation rigide lie ROV et système de photogrammétrie, la connaissance du déplacement de ce dernier suffit à déduire celle du ROV.

Le déplacement du système de photogrammétrie, composé de trois caméras haute résolution dont les orientations internes et externes sont connues a priori, doit donc être évalué. Une phase d'étalonnage précédant la mission, est nécessaire. Ce déplacement est déduit de l'orientation des photographies faites sur des points homologues identifiés et appareillés à la volée sur deux prises de vues consécutives par l'ordinateur embarqué sur le ROV.

Dans la littérature, les méthodes d'ajustement des faisceaux utilisées pour l'orientation des photographies ont prouvé leur efficacité (Lourakis & Argyros, 2009 ; Suenderhauf et al., 2005 ; Xue & Su, 2012) ; néanmoins une phase de calcul est nécessaire afin de déterminer des valeurs approchées indispensables à l'ajustement de faisceaux.

Orientation des photographies.

Considérons que l'ensemble des caméras à orienter, dont M_j est l'ensemble des matrices de projections, observe un ensemble de points dans l'espace X_p et que x_{ij} est la projection du $j^{\text{ième}}$ point sur la $i^{\text{ième}}$ image. Alors, l'orientation des photographes revient à trouver les M_j et X_i qui résolvent l'équation suivante :

$$M_j X_i - x_{ij} = 0 \quad (1)$$

L'orientation des photographes par ajustement des faisceaux revient à exprimer l'équation (1) en tant qu'un problème de minimisation :

$$\min_{M_j X_i} \sum_{i,j} d(M_j X_i, x_{ij}) \quad (2)$$

avec $d(x,y)$, la distance euclidienne entre deux points images x et y .

La minimisation (2) peut être obtenue par la méthode des moindres carrés qui fournit une solution en résolvant itérativement une équation normale sous la forme suivante :

$$J^T J \delta = J^T \epsilon \quad (3)$$

avec J jacobienne de la fonction de reprojection (Lourakis & Argyros, 2009). La méthode des moindres carrés est très coûteuse en temps de calcul et en mémoire. De plus son coût augmente considérablement avec l'accroissement du nombre des paramètres, i.e. des paramètres extrinsèques des caméras et des positions 3D des points. Donc, pour diminuer le temps de calcul il faut réduire le nombre de paramètres.

Dans notre application, le système de photogrammétrie utilisé est un système stéréo dont l'orientation relative est fixe et connue préalablement par étalonnage. Cette caractéristique permet la réduction du nombre des paramètres liées aux caméras d'un facteur de 2 (Xue & Su, 2012). En effet, pour un couple stéréo les paramètres extrinsèques de la caméra droite peuvent être déduits de ceux de la caméra gauche. En prenant en compte cette caractéristique, Xue et Su ont proposé une méthode d'ajustement des faisceaux qui réduit le nombre de paramètres, tout en conservant les informations des observations sur les photos gauche et droite des couples stéréo. Puisqu'elle réduit le temps de calcul par rapport aux méthodes d'ajustement des faisceaux opérant sur les totalités des photographes, cette méthode s'avère adéquate pour notre application, une illustration de l'orientation de quelques images est visible sur la *Figure 1*.

Odométrie : calcul rapide de l'orientation des photographies.

Dans le contexte de l'estimation du mouvement des robots, Suenderhauf et son équipe (Suenderhauf et al., 2005) ont proposé une méthode qui simplifie et accélère l'ajustement de faisceaux. Cette méthode consiste à opérer sur une fenêtre contenant un sous-ensemble des photographies consécutives au lieu de la totalité de photographies. Les photographies dans cette fenêtre sont orientées, et les paramètres estimés sont utilisés comme initialisation pour l'orientation suivante, pour laquelle la

fenêtre est décalée d'une image. De plus, pour résoudre le manque de précision causé par une trop petite variation entre les poses des photographies dans la fenêtre, ne sont seulement retenues que les photographies dont les poses sont suffisamment éloignées, c'est-à-dire distantes de leur prédécesseur dans la fenêtre d'un certain seuil. Ceci correspond à un avancement minimum du véhicule entre deux prises de vues. En combinant les travaux de Suenderhauf et ceux de Xue et Su, nous avons implanté un nouvel algorithme afin d'orienter les images stéréos prises par le ROV.

1. Partant de l'image li , on cherche l'image $li+k$ la plus proche, de sorte que le déplacement entre li et $li+k$ dépasse un certain seuil. Ceci est déterminé par odométrie.
2. Ajout de $li+k$ à la fenêtre.
3. i devient $i+k$, et on répète de l'étape 1, pour avoir 3 paires d'images stéréo dans la fenêtre.
4. On ajuste ensuite les faisceaux suivant la méthode proposée par Xue et Su, et en utilisant les poses obtenues par l'étape 1 comme initialisation.
5. On décale la fenêtre d'une image.

Calcul de l'orientation approchée des photographies pour l'ajustement de faisceaux.

Afin de calculer l'ajustement de faisceaux comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, il convient de calculer des valeurs approchées pour la pose des caméras.

Nous disposons d'une série de points 2D, homologues sur quatre images (deux couples consécutifs). Les points sur le terrain ont été identifiés sur le couple de caméra stéréo à l'instant t , et les mêmes points avaient été identifiés à l'instant $t-1$.

A chaque étape un ensemble de points 2D, vus sur les couples t et $t-1$ sont envoyés à l'ordinateur de surface pour le calcul de la nouvelle position du véhicule.

Calcul de l'orientation du couple t sur le couple $t-1$:

- On considère comme faible le déplacement ($t, t-1$) du véhicule. Dans ces conditions on affecte la pose des caméras à l'instant t des résultats de la pose à l'instant $t-1$ (on considère

que le véhicule n'a quasiment pas bougé par rapport à la fréquence de prise de vue).

- Connaissant les orientations relatives des caméras droite et gauche, et sachant que ces valeurs sont considérées fixes dans le temps, on calcule les points 3D en utilisant les points 2D des couples t et t-1. On a donc deux nuages de points homologues calculés à l'instant t et à l'instant t-1 mais avec les poses des caméras pour les instants t et t-1.

$$[RT]_{\text{droit}} = [RT]_{\text{droit-t-1}}$$

$$[RT]_{\text{gauchet}} = [RT]_{\text{gauchet-t-1}}$$

Si le véhicule était effectivement à l'arrêt alors les deux nuages de points seraient confondus. En fait, le mouvement du véhicule entraîne un déplacement des images des points du terrain sur les couples t-1 et t, et les points calculés représentent deux nuages de points différents.

La transformation rigide [RT] nécessaire pour exprimer les caméras t dans le référentiel t-1 est la transformation rigide nécessaire pour passer du nuage de points 3D obtenu au temps t-1 à celui obtenu au temps t.

Le problème du calcul de l'orientation des caméras au temps t par rapport au temps t-1 se ramène au calcul de la transformation permettant de passer d'un nuage de points à l'autre car dans notre cas les rotations sont minimales.

Ci-après le calcul de la transformation de passage du nuage de points calculé au temps t, noté P, à celui calculé au temps t-1, noté P' :

Nous disposons de deux ensembles de n points homologues $P = \{P_i\}$ et $P' = \{P'_i\}$ avec $1 \leq i \leq n$. On a :

$$P'_i = R \times P_i + T$$

où R est la matrice de rotation et T la translation

La meilleure transformation minimise err, la somme des carrés des résidus d'adaptation :

$$err = \sum_{i=1}^n \|R P_i + T - P'_i\|^2$$

Pour résoudre le problème nous pouvons utiliser la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice de covariance C, ce qui correspond à un algorithme robuste et peu coûteux en temps.

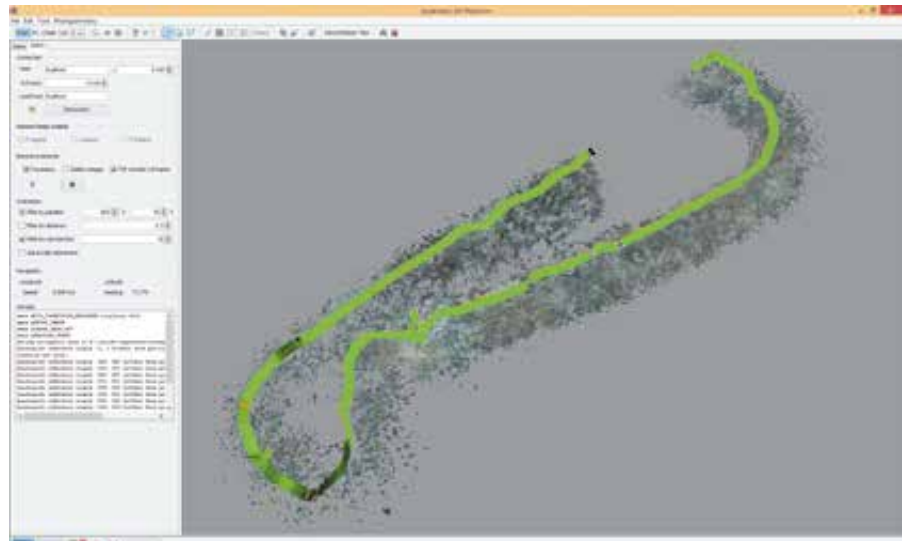


Figure 2. Odométrie visualisée en temps réel à bord du navire. On peut voir sur cette figure le nuage de points 3D calculé sur le terrain survolé, la position du véhicule à chaque couple de photographies. La densité des points mesurés sur chaque photo est représentée par un code de couleur, jaune-vert-noir, qui donne un aperçu de la qualité de l'orientation (jaune < 30 points, vert entre 100 et 200 points, vert sombre > 300 points).

$$C = \sum_{i=1}^n (P_i - \text{barycentre}_p) \times (P_i - \text{barycentre}_p)^T$$

$$[U, S, V] = \text{SVD}(C)$$

$$R = VU^T$$

$$T = -R \times \text{barycentre}_p + \text{barycentre}_{p'}$$

Une fois exprimées les poses du couple t dans le système de référence du couple t-1, les points 3D peuvent être recalculés en utilisant les quatre observations dont on dispose pour chaque point.

Un ensemble de contrôles est mis en place afin d'éliminer les fautes d'appariement (contrôle de la droite épipolaire, contrôle de cohérence de la parallaxe en y, contrôle des résidus de reprojection). Une fois validées, les poses des caméras à l'instant t sont utilisées comme valeurs approchées pour le calcul par ajustement de faisceaux présenté au paragraphe précédent.

Reconstruction 3D dense.

A l'issue de l'étape d'orientation, ici de l'orientation de deux couples consécutifs d'images stéréo, le nuage de points 3D obtenu est de faible densité. Dans la chaîne de traitement mis en œuvre ici, l'orientation de ces quadruplets est faite dans la boucle de temps réel à 10Hz. Il peut être utile pour les responsables des opérations d'avoir un modèle 3D partiel, à l'échelle, pendant que le ROV poursuit son relevé. Pour ce faire, nous avons développé un module de densification des nuages de points qui s'appuie sur les photo-

graphies originales de la prise de vue, et qui est possible une fois les images transférées à bord (dans le futur, cette densification pourra être réalisée par l'ordinateur embarqué dans le ROV, mais le manque de ressource actuel de cette machine rend ceci difficile : en effet, la machine embarquée est soumise à des contraintes de volume, de consommation, et d'échauffement qui réduisent ses performances).

Cette densification est cependant nécessaire afin de reconstruire un modèle 3D réaliste. Cela est réalisé par les méthodes MVS (*Multi View Stereo*) qui produisent un nuage de points dense à partir des photographes et des paramètres des caméras. Furukawa (Furukawa & Ponce, 2010) a proposé une méthode fondée sur une reconstruction par "patch, (PMVS Patch-Based Multi View Stereo). La surface S, qui contient un point 3D p quelconque de la scène, est modélisée par un morceau carré d'un plan tangent à S en p, le "patch". La position 3D du patch est ensuite déterminée par une minimisation de la variance entre ces projections sur les photographes. L'algorithme fonctionne en trois étapes :

- Initialisation d'un ensemble de patches par des points d'intérêt.
- Expansion qui consiste à reconstruire de nouveaux patches autour de ceux déjà trouvés.



- Filtrage pour renforcer la cohérence et éliminer les patches erronés.

Nous avons implanté cette méthode pour l'intégrer dans notre chaîne de traitement (voir Figure 1). En revanche, contrairement à PMVS, nos développements utilisent directement les images produites par les caméras, sans étape de rectification, ni de correction de la distorsion, et une adaptation de l'algorithme est donc nécessaire, surtout pour le calcul des droites épipolaires.

En effet, la distorsion transforme la droite épipolaire en une courbe épipolaire, dont la courbure s'accroît avec l'augmentation de la distorsion. Pour des raisons de simplicité de calcul, cette courbe est modélisée par un arc de cercle en se fondant sur le fait que la distorsion radiale est beaucoup plus importante, et perturbe principalement la projection de la scène sur l'image. L'algorithme de calcul de l'équation de la courbe épipolaire pour un point M est le suivant :

1. Les coordonnées de M sont corrigées de la distorsion et de l'excentrement.
2. En utilisant les nouvelles coordonnées de M, l'équation de la droite épipolaire idéale (dr) est déterminée comme précédemment.
3. Les deux points d'intersection de (dr) avec le cadre de l'image sont calculés.
4. Le point barycentre de ces deux points est calculé.
5. La distorsion et l'excentrement de la caméra 2 sont appliqués sur les trois points, les deux points d'intersection et leur barycentre.
6. Les trois nouveaux points obtenus sont les points qui définissent l'arc de cercle

■ Incertitude de mesure et contrôle

L'orientation en temps réel réalisée durant l'odométrie, en utilisant le fait que le déplacement du véhicule est lent et que les images sont très proches d'une vue sur l'autre, ne peut donner d'excellents résultats sur l'ensemble des photographies. En effet, le principal problème est la restriction des points communs à quatre ou six photographies, c'est-à-dire à deux ou trois couples stéréo consécutifs.

Si l'odométrie présentée ici est suffisante pour assurer en temps réel la couverture effective du site, il n'en va

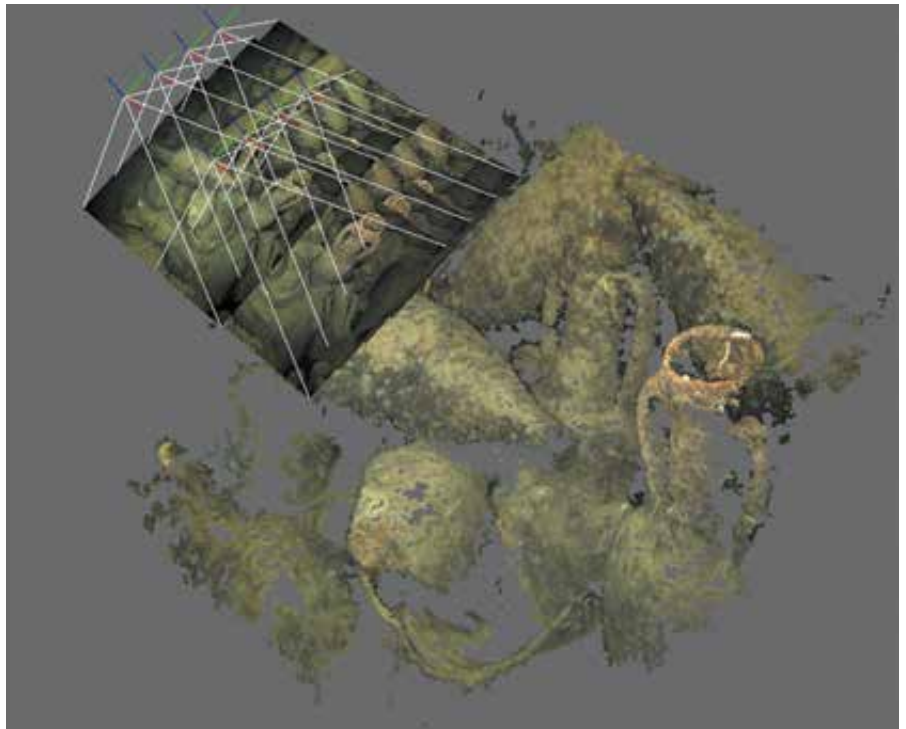


Figure 3. Quatre couples stéréo consécutifs, orientés par l'approche bundle décrite plus haut, et densification locale effectuées sur les images originales.

pas de même pour ce qui est de la précision du modèle final, car l'ambition est de reconnaître automatiquement chaque artefact, et d'évaluer sa variance au modèle théorique.

Nous avons donc mis en œuvre une seconde étape dans laquelle les points homologues sont extraits et appareillés sur toutes les photographies, tandis qu'un ajustement de faisceaux assure la meilleure orientation possible, tout en prenant en considération les contraintes liées à la tripléte de caméras fixes et calibrées.

Deux logiciels sont alors interfacés avec le système développé : Photoscan d'Agisoft et Bingo. L'utilisation conjointe de ces deux logiciels permet de maîtriser l'ajustement final et la précision du modèle résultant.

La confrontation des deux modèles — celui obtenu par odométrie avec celui obtenu par ajustement de faisceaux traditionnels, dans lequel sont prises en compte toutes les observations possibles de points 3D (l'appariement des points 2D y est fait sur toutes les photographies) — met en évidence, sur des passes de plus de 1 000 photographies, des résidus de l'ordre de 5 mm dans le plan (X,Y) et du centimètre dans le sens de la profondeur. Ces données

sont en fait à moduler en fonction de la qualité du terrain survolé : dans le cas de sol sableux, sans grand contraste et sans élément aisément remarquable, les points identifiés sont peu nombreux et de qualité moyenne, tandis que dans les zones de survol des amphores, le nombre de points est nettement plus important, leur qualité bien meilleure, et les résidus entre modèles plus faibles (voir Figure 2).

Le modèle global, obtenu par ajustement de faisceau sur l'ensemble des images hautes résolutions est mis à l'échelle en introduisant la base stéréo, d'environ 0.3 m comme contrainte dans le calcul. Au final, plus de 1 000 couples sont concernés par cette contrainte et les résidus sur leur base sont tous inférieurs au millimètre.

L'expérimentation archéologique

■ L'épave

Immense terre d'amphores empilées, l'épave Cap Bénat 4 a été découverte en 1977 au gré d'une promenade abyssale du sous-marin Griffon (Marine Nationale), par 328 m de fond, à environ 1 km au large du sémaphore de Bormes-les-Mimosas. L'année de sa

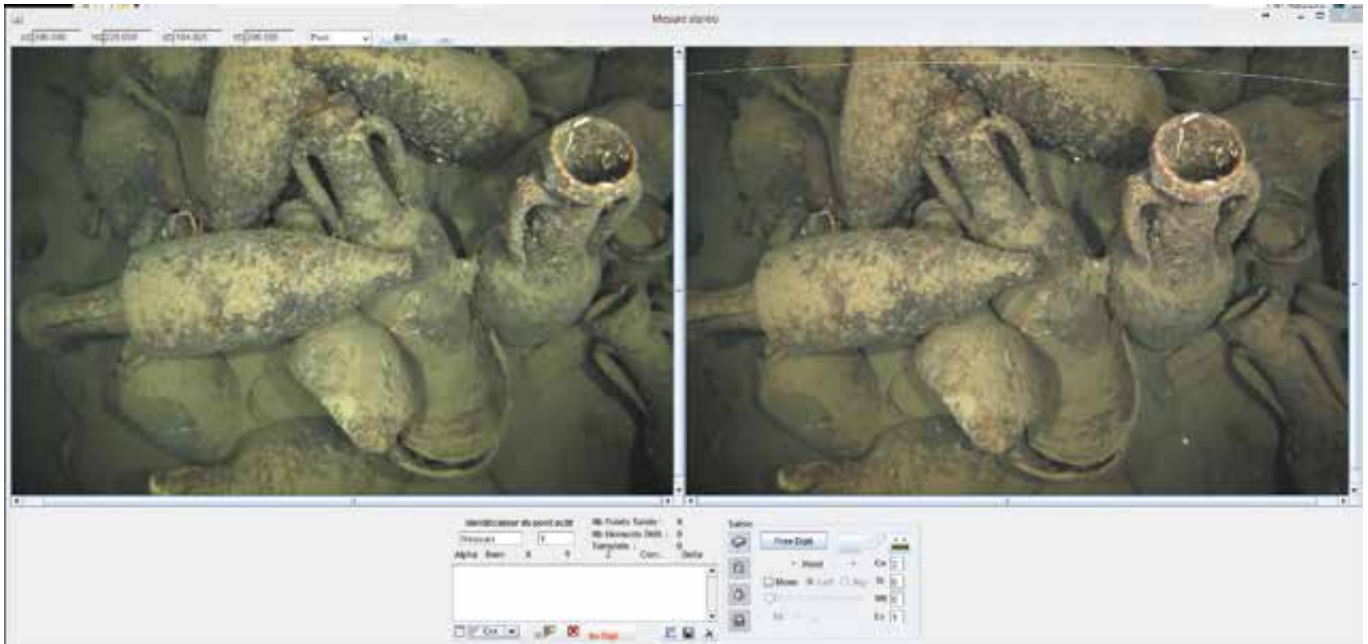


Figure 4. Prises de vues stéréo-photogrammétrique extraites du survol odométrique lors du relevé de l'épave Cap Bénat 4. On voit sur l'image de droite une représentation de la courbe épipolaire rendant compte de la forte distorsion présente dans les images produites par les caméras sous-marines. Cette modélisation par un arc de cercle est indispensable aussi bien dans le calcul temps réel de l'odométrie que dans l'étape de densification du nuage de points.

découverte puis en 1981, l'épave a bénéficié de deux courtes expertises, la première avec le Griffon, celui-là même qui l'avait repérée, et la seconde avec la soucoupe Cyana (IFREMER). Ces deux plongées, au cours desquelles une dizaine de récipients furent collectés, avaient permis d'évaluer approximativement la taille du tumulus d'amphores à environ 15 m de long pour 5 ou 6 m de large et sa constitution à plusieurs centaines d'amphores Dressel 1A. En 1981, pour compléter notre connaissance du mobilier, trois urnes-gobelets avaient été récupérées en même temps que des amphores grâce au bras télémanipulateur de la soucoupe Cyana.

■ Enjeux et apports de la mission Cap Bénat 4

Faisant suite au projet européen Vénus (*Virtual ExploratioN of Underwater Sites*), qui a été initié dans les eaux françaises en 2008 sur l'épave profonde Port-Miou C par 105 m de fond, cette nouvelle mission a réuni en 2014 trois des partenaires marseillais officiels à l'origine du projet Vénus. En effet, c'est sous la tutelle de la COMEX, du DRASSM et du laboratoire LSIS (CNRS) qu'une nouvelle incursion à caractère scientifique en zone mésale a pu être conduite, cette fois sur la plus profonde

des épaves antiques recensées en France : l'épave Cap Bénat 4. On notera que ces trois partenaires sont notamment impliqués dans l'étude des épaves profondes depuis les années 1990, un domaine d'intervention hautement sensible, que le DRASSM a initié dès les années 1980, et qui concerne l'étude et la protection d'un très riche, mais à la fois très fragile, patrimoine sous-marin. Sur l'épave Cap Bénat 4, le but était d'obtenir, au moyen d'un ROV filoguidé Apache, un modèle 3D du gisement, à haute résolution et haute précision (millimétrique), avec une texture colorimétrique du site. Mais à la différence des autres opérations de ce genre, le relevé sur l'épave Cap Bénat 4 n'a comporté aucun caractère intrusif pour le gisement puisqu'il était uniquement fondé sur des prises de vues verticales déclenchées à une distance d'environ 1 m d'altitude. Il n'y a donc eu aucun contact physique avec le sol, ni aucune pose au préalable de marqueur, de règle de mesure ou de calibration. Dans le même esprit, tout prélèvement était proscrit, car le but de cette mission était de se démarquer aussi des opérations prestigieuses, à gros moyens et fortement médiatisées, où les archéologues, soumis au "syndrome de la benne", jouent aux apprentis-sorciers

sur des sites qu'ils mutilent et dont ils ne conservent qu'une représentation erronée. Ainsi en 1981, la plongée sur l'épave Cap Bénat avec la soucoupe Cyana et la logistique de l'IFREMER, si elle avait autorisé techniquement le prélèvement d'amphores, causant au passage un peu de casse, n'avait en aucune façon permis à l'archéologue d'enregistrer le moindre plan du gisement, excepté quelques photographies et une vue d'artiste, voir *Figure 3*.

Le bilan de l'opération 2014 est donc tout autre, l'ensemble des informations a été recueilli en deux journées sur site, tandis que tous les objectifs ont été atteints, sans déplorer d'incident technique, excepté un petit problème de mise au point de la caméra principale du ROV Apache, au demeurant rapidement réglé.

Si les données sont actuellement en cours de traitement au laboratoire LSIS, il apparaît d'ores et déjà que les orientations et les évaluations faites lors des deux premières campagnes, en 1977 et 1981, étaient devenues complètement obsolètes et ont pu être reprécisées en 2014. Il faut rappeler ici l'intérêt pour les archéologues d'intervenir sur un site profond qui n'a pas été chahuté et qui, par conséquent, peut livrer des informations capitales sur son organisation



► structurelle et sur la disposition de son chargement.

A la lumière de cette nouvelle mission sur l'épave, on peut considérer désormais avec certitude que son tumulus est orienté Ouest-Est, que sa longueur de 16,5 m, sa largeur de 7 m et sa hauteur maximale de 2 m. Le nombre de récipients, évalué à l'origine à quelques centaines, atteint d'emblée, après révision, le millier d'individus et va être très prochainement précisé à l'amphore près. En outre, on dispose maintenant de l'emplacement précis des urnes-gobelets qui composaient un fret complémentaire et qui désigne vraisemblablement, à l'ouest, l'arrière du navire. Mais, le plus édifiant est la nouvelle appréciation morphologique du tumulus qui laisse clairement percevoir des zones de chargement différentes. Ainsi, sur le premier tiers du navire, à l'est, on ne distingue que 2 couches d'amphores, qui se sont visiblement couchées vers l'Est. Dans le 2^e tiers, qui correspond à la partie centrale du navire, les amphores droites sont cette fois disposées sur une bien plus grande hauteur (2 m), soit au moins sur trois couches, tandis que sur le dernier tiers, à l'ouest, elles sont à nouveau ensablées et accusent un volume moindre. S'il est encore prématuré de tirer des conclusions de ces nouvelles observations, tant un navire antique connaît des vicissitudes après son naufrage au gré de l'effondrement sous le poids des amphores de ses parois progressivement gorgées d'eau, on peut néanmoins émettre une première hypothèse. Il pourrait s'agir en effet de l'existence à l'origine de parties pontées — sur l'étrave et l'étambot —, qui limitaient le nombre d'amphores en hauteur, et de parties qui ne l'étaient pas — au centre —, où le chargement accusait par conséquent une couche d'amphores supplémentaires.

A l'évidence, et avec des captures rapides d'informations 3D de ce type (voir Figure 3 et Figure 4), l'enjeu pour l'archéologue, sera désormais de



Figure 5. "Vue d'artiste" de l'épave Cap Bénat 4, réalisée en 1981 depuis le Cyana.

disposer très vite d'un fac-similé du gisement, précis au millimètre, autorisant un grand nombre d'observations et de vérifications. Ces analyses pourront porter sur le comptage précis des récipients, qui tiendra compte des cols très enfouis sortant à peine du sable, et sur les caractéristiques du tumulus qui nous renseignent sur la forme du navire et l'organisation du chargement. A terme, des algorithmes permettront de redresser virtuellement les amphores couchées et reconstruire le volume original du navire, afin de mieux appréhender ses lignes et son type de navigation. Enfin, la possibi-

lité de garder en mémoire la couche de surface du site, nous garantit de conserver des informations qui risquent de disparaître les premières à l'avenir, au gré du passage des chalutiers, des navires câbliers ou de plongeurs "tech" recourant à plusieurs mélanges gazeux, tandis que les données enfouies sous le sédiment résisteront mieux au temps.

■ Le mobilier archéologique

Les amphores

Du point de vue historique, ce chargement d'amphores s'inscrit dans le vaste mouvement de commerce qui draine vers la Gaule, dans la deuxième moitié du II^e siècle avant J.-C., le vin italien et la vaisselle de table ou de stockage. Les premières évaluations du chargement avaient conduit à penser dès 1981 qu'il pouvait s'agir d'un navire de 300 amphores, comme le stipulait la Lex Claudia en 218 avant J.-C., qui, selon Tite Live, limitait la capacité de charge des navires appartenant aux sénateurs ou à leurs fils. Mais le décompte des récipients du navire grâce, désormais, aux premières restitutions qui ont été faites dans le cadre de notre mission, laisse apparaître un nombre bien plus important d'amphores qui doit se situer autour d'un millier d'individus.

Du point de vue typologique, ces amphores du chargement correspondent à des récipients de transport

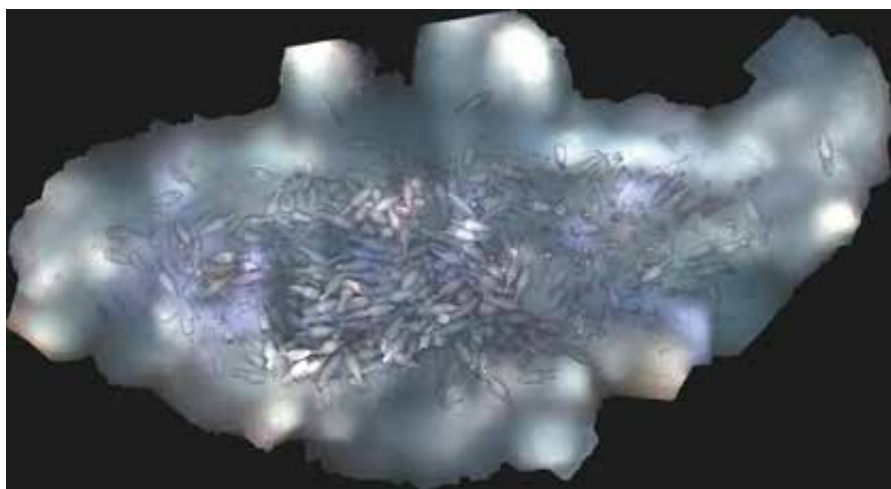


Figure 6. Orthophotographie du site, projection sur un plan horizontal.



Figure 7. Orthophotographie du site, projection sur un plan vertical passant par l'axe longitudinal de l'épave.

vinaires italiens de type Dressel 1A, relativement standardisés et anépi-graphes. Au vu des modèles qui ont été prélevés en 1977 et 1981, avec le sous-marin Griffon et la soucoupe Cyana, elles sont plutôt petites, d'une hauteur totale qui n'atteint pas le mètre (99 cm), et d'une contenance qui varie entre 19 et 19,5 litres. Elles sont donc encore assez éloignées du barème de 26 litres qui prévaut pour la plupart des amphores Dressel 1B dès le début du I^{er} siècle avant J.-C. et qui correspond à l'amphora, ou quadrantal, mesure de capacité romaine d'un pied cube. Par leur morphologie, elles appartiennent bien à la famille Dressel 1A, même si elles correspondent semble-t-il à un modèle hybride entre la gréco-italique et la Dressel 1. La forme Dressel 1A fut définie par N. Lamboglia en 1955 sur la base de la toute première table typologique entreprise dès 1872 par H. Dressel et publiée en 1899 (*Corpus Inscriptionum Latinarum*, volume XV). D'autre part, cette forme correspond, au type E de Lyding-Will. Les modèles de référence de la Dressel 1A sont donc un peu différents des amphores de l'épave du Cap Bénat qui rappellent encore par certains détails les amphores gréco-italiques tardives, à panse en ogive, de la deuxième moitié du II^e siècle avant J.-C. De fait, du point de vue morphologique, les amphores de Cap Bénat 4 sont notamment reconnaissables par la forme des anses et leur attache près du col, le col lui-même tronconique évasé vers le bas, les épaules tombantes, la panse fuselée, et le pied court et fin. Elles se rangent dans un groupe d'amphores dont les chargements immergés ont été recensés sur les épaves suivantes : Mont Rose, à Marseille, Canonnière du Sud, à la Ciotat, Filicudi A et Punta Scaletta, en Italie, Pointe du Brouil, Cavalière et Roche Fouras, sur la Côte d'Azur. En conséquence, et dans l'état de l'étude, la fourchette chronologique qui paraît le mieux convenir à ce type d'amphores paraît se situer dans les années 125-100 avant J.-C. Sur les modèles qui avaient été récupérés, la pâte de couleur incluant un dégrais-sant constitué de particules noires et de fines inclusions brillantes, est assez proche des pâtes vésuviennes.



Figure 8. Urne-gobelet, visible sur le relevé haute définition obtenu trois jours après la mission en mer.

Les urnes-gobelets à lèvre en amande

Au total, durant cette courte campagne d'observation de l'épave avec les ROV Apache et Super-Achille, ont été localisées huit urnes-gobelets à lèvre en amande sur l'une des extrémités du site, ce qui porte à 11 le nombre total de ces vases attestés sur l'épave, si l'on tient compte des 3 exemplaires récupérés en 1981. On peut considérer dès lors que ces ollae en céramique commune, dont certaines sont encore disposées les unes dans les autres, étaient en phase de chargement et complétaient la cargaison d'amphores. Ces vases, dont la lèvre en amande est directement soudée sur le haut du corps, présentent en effet une panse assez galbée et une variété dimensionnelle et morphologique qui permettait de les emboîter les uns dans les autres au cours du voyage.

Ce type de vase, utilisé pour la cuisine et le conditionnement des produits, est bien attesté dans la zone tyrrhénienne septentrionale et centro-méridionale, au II^e et au I^{er} siècle avant J.-C. On le retrouve ainsi dans le Latium et l'Etrurie méridionale à l'époque républicaine tardive. Sa forme très répandue rappelle la tradition des urnes buchéroïdes étrusques de la fin du V^e siècle avant J.-C. dont des exemplaires sont connus sur l'épave Grand Ribaud F. Dans la typologie actuelle, on rattache cette forme aux types : olla COM-IT 1 de Lattes, 2 de M. Vegas, 1, 2, 3, 4 et 6 d'Albintimilium et 3 de la typologie des céramiques communes produites à Rome et dans le Latium. En Italie, ces vases sont attestés à Albintimilium, Luni, Cosa, Gabii, Sutri,



© Ph. Foliot, CCJ/CNRS

Figure 9. Deux des trois urnes-gobelets prélevées par Cyana en 1981.

Ostie, Rome, où ils appartiennent à un contexte de la Domus Publica daté entre les années 15-10 avant J.-C., dans l'*ager Veientanus* où les plus anciens sont datés du V^e avant J.-C., et sur de nombreux sites de la vallée du Tibre. On les connaît par ailleurs à Pompéi et Stabies ; en Gaule à Olbia, à Marseille, dans un contexte hellénistique (Baou de St Marcel) ; dans la péninsule ibérique à Pollentia (Majorque), Ampurias, Burriac, L'Argilera, Valence et Siviglia et dans le territoire du Guadalquivir inférieur. Par ailleurs, des urnes à lèvre en amande de Tarraconaise ont été récemment attribuées à l'aire de production de l'Italie centrale et méridionale sur la base d'analyses archéométriques. Sur les épaves, en dehors de Cap Bénat 4, un petit nombre d'ollae à lèvre en amande, la plupart de taille moyenne, sont connues sur des navires d'époque républicaine tardive, avec des amphores Dressel 1 et parfois de la vaisselle campanienne à vernis noir. C'est le cas sur les épaves d'Albenga (vers 90-80 avant J.-C.), Spargi (vers 120-100 avant J.-C.), "*Secca dei Mattoni*" (Ponza) (fin II^e-début I^{er} avant J.-C.) sur la côte tyrrhénienne ; en France sur La Ciotat 3 (vers 80 avant



Figure 10. Modèle 3D de l'épave Cap Bénat 4. 328 m de profondeur, deux heures de plongée, 12 000 photographies.



J.-C.), Fourmigue C (vers 70-60 avant J.-C.), Cavalière (vers 100-75 avant J.-C.), Grand Congloué 2 (vers 110-70 avant J.-C.), et Sant Jordi (vers 100-75 avant J.-C.), à Majorque. Ces productions fragiles, vraisemblablement chargées dans des caisses au-dessus des amphores, sont associées à des circuits commerciaux maritimes à long rayon d'action, le plus souvent à la fin de la République.

■ Analyse des résultats

L'un des avantages de l'étude des épaves profondes est leur lisibilité directe, ce qui permet de comprendre avec plus de facilité que pour d'autres épaves l'agencement du navire. Située loin du bord, au-delà des zones d'herbier et de sédimentation toujours très forte près des côtes, les vestiges de l'épave Cap Bénat 4 se sont offerts sans difficulté à l'analyse scientifique.

Lors de la mission 2014, les informations obtenues en très peu de temps sur le site permettent de reconsidérer complètement notre connaissance du gisement. Si l'analyse ne traite que de la partie supérieure du talus d'amphores, qui dépassait du sable, elle apporte néanmoins des précisions sur l'orientation, les dimensions et la forme du site. De fait, de nouvelles hypothèses viennent nourrir la réflexion sur ce gisement, plus précisément : sur la structure et les aménagements du navire, les différentes parties du chargement, le volume de la cargaison, le nombre d'amphores visibles, les variantes morphologiques entre les conteneurs. Le degré de connais-



Figure 11. Modèle 3D de l'épave Cap Bénat 4. Détail.

sance de l'archéologue se décline aussi bien sur une perception globale du chargement que sur sa connaissance désormais plus approfondie du complément de fret, constitué par une série d'urnes-gobelets emboîtées les unes dans les autres, sur une extrémité du navire, vraisemblablement l'arrière. Cette reconstitution de l'épave, issue d'une capture photogrammétrique rapide et non intrusive, autorise donc la poursuite à terre de l'étude du site, la mesure des objets au millimètre, tout en affinant les observations et en générant de nouvelles problématiques.

Ainsi, le travail d'analyse à partir des données collectées, va par exemple consister, à restituer également les amphores qui sortent à peine du sable, afin de réévaluer les étagements successifs du chargement, et redresser les parties affaissées, mettant ainsi en forme le navire. On le voit, il est matériellement possible aujourd'hui d'étudier en détail un gisement antique profond au moyen de sa représentation

virtuelle, ce qui relève d'une perception plus intelligible que ne l'est la réalité, sans avoir besoin de replonger dans son milieu naturel.

Paradoxalement, les données récentes acquises sur l'épave Cap Bénat 4 rivalisent aujourd'hui, dans les archives du DRASSM, avec le contenu scientifique de bien des épaves identiques, fouillées par des plongeurs sur des fonds facilement accessibles mais ô combien plus destructeurs.

Conclusions et perspectives

L'approche présentée dans cet article a été développée dans le cadre du projet ROV 3D. Il s'agit de mettre en œuvre un relevé 3D d'une épave, ou de tout autre site, par photogrammétrie, à grande profondeur, soit au moins au-delà de 100 m.

La méthode développée est totalement sans contact et non intrusive, déployée depuis un petit ROV. Seul le temps



nécessaire au survol est indispensable au relevé.

L'approche photogrammétrique comporte deux aspects correspondant à deux nécessités de ce type de relevé : d'une part, une estimation temps réel de la zone couverte, avec possibilité de faire des mesures par sondages locaux, d'autre part, un relevé haute définition, en temps différé, offrant une précision millimétrique et une couverture quasi exhaustive.

Ces deux aspects sont gérés simultanément par l'instrumentation mise en œuvre sur le ROV. Un calcul d'odométrie temps réel, visualisable à bord, permet l'orientation approchée de toutes les photographies prises depuis le ROV, elle aussi en temps réel. Parallèlement, des images hautes résolutions sont enregistrées sur l'ordinateur embarqué et permettent le calcul d'un modèle 3D haute résolution de la zone survolée.

Il est à noter que l'approche purement photogrammétrique choisie autorise des relevés de structures complexes, grottes, surplomb et ne se limite plus au relevé traditionnel bathymétrique où le produit final n'est autre qu'un DEM (*Digital Elevation Model*).

Une première expérimentation du système, présentée dans cet article, a été effectuée en une seule plongée au large de la commune de Bormes-les-Mimosas, sur l'épave antique Cap Bénat 4, par 328 mètres de profondeur.

■ Au-delà de cette approche

La fouille archéologique est le plus souvent irréversiblement destructive, il importe alors de l'accompagner d'une documentation pertinente rendant compte des connaissances accumulées sur le site. Cette documentation est généralement iconographique et textuelle. Les représentations graphiques des sites archéologiques dessins, coupes, planimétries, esquisses, aquarelles, photographies, topographies, photogrammétriques sont un passage obligé pour parler de relevé. Cependant, comme le souligne Olivier Buchsenschutz dans l'introduction au colloque Images et relevés archéologiques, de la preuve à la démonstration, en Arles en 2007 (Buchsenschutz, 2007, Introduction page 5) : "*Même*

très précis, le dessin ne retient que certaines observations pour soutenir une démonstration, tout comme un discours ne retient que certains arguments, mais ce tri n'est pas généralement explicite." Ceci pose en quelque sorte les fondements des prolongements de ce travail : le relevé est tout à la fois une représentation métrique du site et une interprétation de ce même site par l'archéologue.

Le relevé est une composante très importante de cette documentation, et son importance est due en grande partie au fait que les concepts manipulés par les archéologues lors d'une fouille sont fortement liés à l'espace. La structure même de la fouille s'articule autour de la notion d'unité stratigraphique. Héritée d'une approche géologique puis formalisée pour l'archéologie par E.-C. Harris (Harris, 1979), les unités stratigraphiques sont liées entre elles par des rapports géométriques, topologiques et temporels, et structurent la lecture de la fouille.

Deux familles d'objets sont donc à relever : des portions de terrain, ou plus généralement des zones de l'espace, organisées en unités stratigraphiques, et des artefacts que l'on cherche à positionner dans l'espace, et éventuellement à représenter finement après une étude en laboratoire. Le travail présenté ici fonde ces deux aspects — le relevé de l'espace et celui des artefacts — en abordant deux approches différentes, l'une fondée uniquement sur la géométrie, et la seconde qui utilise des connaissances a priori lors de la mesure. Le relevé du terrain, par exemple, s'appuie sur des outils de photogrammétrie et n'est représenté que par un ensemble de points reliés entre eux. La seconde approche, fondée principalement sur la connaissance que l'on a des artefacts mesurés, utilise cette connaissance pour dimensionner et positionner l'objet dans l'espace en s'appuyant sur le nuage de points existant. Un travail de représentation des connaissances par ontologie (Monroy, 2010) et de reconnaissance de formes tant 2D que 3D a déjà été engagé (Mahiddine, Merad, Drap, & Boï, 2014) et devra rapidement permettre d'extraire du nuage de points les objets pertinents, reconnaître leur typologie et mettre en évidence

leur éventuelle déviation au modèle théorique. Cet aspect du travail est développé dans un projet de recherche financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), le projet GROPLAN (Généralisation du Relevé, avec Ontologies et Photogrammétrie, pour l'Archéologie Navale et Sous-marine) (<http://www.groplan.eu>). ●

Contacts

Pierre DRAP, Julien SEINTURIER, Bilal HIJAZI, Djamel MERAD, Jean-Marc BOI
LSIS - UMR CNRS 7296, Centre National de la Recherche Scientifique, Marseille, France
Bertrand CHEMISKY, Emmanuelle SEGUIN,
COMEX, Marseille, France

Luc LONG,

Department of Underwater Archaeological Research DRASSM, Marseille, France

Références

- Bass, G. F. (1970). *Archaeology under Water* (Penguin Book ed.). Harmondsworth: Pelican Book.
- Bass, G. F., & Rosencrantz, D. (1973). *L'utilisation des submersibles pour les recherches et la cartographie photogrammétrique sous-marine*. Paper presented at the L'archéologie subaquatique, une discipline naissante. Paris.
- Buchsenschutz, O. (2007). *Images et relevés archéologiques, de la preuve à la démonstration* Paper presented at the 132^e congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Arles.
- Chapman, P., Bale, K., & Drap, P. (2008). *Exploring Underwater Sites: Virtual Submarine Allows Access to Europe's Shipwrecks*. *Journal of Ocean Technology*, 3 N° 4, 36-43.
- Ciani, J. B., Hunter, E. K., Dowling, C. B., & Brunk, D. H. (1971). *Seafloor surveying by divers*. *ASCE J Surv Mapp Div*, 97(SU2), 149-164.
- Drap, P., & Long, L. (2001, 28-30 November). *Towards a digital excavation data management system: the "Grand Ribaud F" Etruscan deep-water wreck*. Paper presented at the VAST 2001. Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage, Glyfada, Greece.
- Drap, P., Merad, D., Boï, J.-M., Mahiddine, A., Peloso, D., Chemisky, B., et al. (2014). *Underwater Multimodal Survey: Merging Optical and Acoustic Data*. In O. Musard, Le





Dû-Blayo, L., Francour, P., Beurier, J.-P., Feunteun, E., Talassinis, L (Ed.), Underwater Seascapes: From geographical to ecological perspectives (Vol. XVII, pp. 221-239): Springer-Verlag.

Drap, P., Merad, D., Mahiddine, A., Seinturier, J., Gerenton, P., Peloso, D., et al. (2014). *In situ underwater measurements of red coral: Non-intrusive approach based on coded targets and photogrammetry*. International Journal of Heritage in the Digital Era.

Drap, P., Merad, D., Seinturier, J., Mahiddine, A., Peloso Daniela, Boï, J.-M., et al. (2013, Oct. 28 2013-Nov. 1 2013). *Underwater photogrammetry for archaeology and marine biology: 40 years of experience in Marseille, France*. Paper presented at the Digital heritage 2013, International Congress, Marseille, France.

Faig, W. (1979). *Photogrammetric surveys of underwater objects*. Proceedings coastal mapping symposium, August 1978, Rockville, Maryland, (American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA), 183-187.

Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). *Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis*. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 32(8), 1362-1376.

Gracias, N., Ridaou, P., Garcia, R., Escartin, J., L'Hour, M., Cibecchini, F., et al. (2013, June). *Mapping the Moon: Using a lightweight AUV to survey the site of the 17th Century ship 'La Lune'*. Paper presented at the Oceans IEEE, Norway, Bergen.

Harris, E. C. (1979). *Principles of Archaeological Stratigraphy* (Academic Press ed.). London.

Hesnard, A. (1989). *L'épave Grand Ribaud D. Les apports de la photogrammétrie sous-marine* Le courrier du CNRS, archéologie en France métropolitaine, 73, 66-67.

Hoehle, J. (1971). *Reconstruction of the underwater object*. Photogramm Eng, 37(9), 948-954.

Johannessen, R., & Prytz, F. (2005). *Underwater Metrology Exploiting old techniques for underwater surveying and metrology*. Hydro INTERNATIONAL, December, 22-23.

Liou, B. (1973). *Recherches archéologiques sous-marines*. Gallia, 31(2), 571-608.

Long, L. (1986). *The Wreck of Carry-le-Rouet: an evidence about stone-sea-transport at the end of the second century or at the beginning of the first century BC. Beneath the Waters of time*.

Long, L. (1988). *The Ancient wreck of Carry-le-Rouet : evidence of sea transport of*

stone in the 2nd or 1st century B.C. Paper presented at the Archeology in solution, proceedings of the Seventeenth annual conference on underwater archaeology, Sacramento USA.

Long, L. (1995). *Les archéologues au bras de fer, Nouvelle approche de l'archéologie en eau profonde. Protection du patrimoine archéologique sous-marin en Méditerranée, 100 sites historiques d'intérêt commun méditerranéen*, documents techniques V, A.M.P.H.I., 14-46.

Long, L., & Delauze, H. G. (1996). *Marseille, L'épave Sud-Caveaux 1, Une nouvelle expérience en matière d'archéologie sous-marine profonde*. Bilan Scientifique du Drassm, 1996, 84-86.

Long, L., & Drap, P. (2010). *Au large de Marseille, L'épave Port-Miou C*. Bilan Scientifique du DRASSM, 2010, 80-81.

Long, L., Drap, P., Gantes, L.-F., & Rival, M. (2001). *L'épave Grand Ribaud F, Rapport Scientifique Intermédiaire Année 2001*. Bilan scientifique du DRASSM.

Long, L., & Illouze, A. (2002). *La Lune, un vaisseau de Louis XIV perdu en 1664 au large de Toulon. Historique du naufrage et photogrammétrie de l'épave par 90 m de fond*. Cahiers d'Archéologie Subaquatique, XIV, 167.

Lourakis, M. I. A., & Argyros, A. A. (2009). *SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment*. ACM Trans. Math. Softw., 36(1), 1-30.

Mahiddine, A., Merad, D., Drap, P., & Boï, J.-M. (2014, August 11-14). *Partial 3D-Object Retrieval Using Level Curves*. Paper presented at the Soft Computing and Pattern Recognition SoCPaR 2014, Tunis, Tunisia.

Monroy, C. (2010). *A Digital Library Approach to the Reconstruction of Ancient Sunken Ships*. Texas A&M University.

Negrel, J. C., & Clerc, J. P. (1973). *Relevé photogrammétrique d'une coque du bas-Empire : (Epave B - Pointe de la Luque) étude d'une méthode simplifiée nécessitant moins de matériel que sur les expériences déjà réalisées notamment en France sur l'épave Planier III et à la Madrague de Giens*. Cahiers d'Archéologie subaquatique, II.

Pollio, J. (1968). *Application of underwater photogrammetry*. Naval Oceanographic Office, 46.

Pollio, J. (1971). *Underwater Mapping with Photography and SONAR*. Photogramm Eng, 37(9), 955-968.

Pomey, P. (1985). *Perspectives d'avenir pour l'archéologie sous-marine : l'archéologie en eau profonde. Deuxièmes Journées*

d'Etude sur la Plongée Scientifique, Bulletin de l'institut Océanographique de Monaco., 59-74.

Suenderhauf, N., Konoldige, K., Lacroix, S., & Protzel, P. (2005). *Visual Odometry using Sparse Bundle Adjustment on an Autonomous Outdoor Vehicle*. Tagungsband Autonome Mobile Systeme, Stuttgart (Germany), Reihe Informatik aktuell, Springer Verlag, 157-163.

Tchernia, A., & Pomey, P. (1990). *Besoins en technologie de l'archéologie sous-marine*. Paper presented at the Colloque ISM.

Tchernia, A., Pomey, P., & Hesnard, A. (1978). *L'épave romaine de La Madrague de Giens (Var)*. Supplément à Gallia N° 34.

Xue, J., & Su, X. (2012). *A new approach for the bundle adjustment problem with fixed constraints in stereo vision*. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 123(21), 1923-1927.

ABSTRACT

Key words: Underwater archaeology, underwater photogrammetry, odometry, real-time orientation, high definition 3D model

In this paper we present an approach for deep-sea survey based on photogrammetry using a remotely operated underwater vehicle (ROV). A hybrid technique gives us real-time results, sufficient for piloting the ROV from the surface vessel and ensuring a uniform coverage of the site as well as recording high-definition images using an on-board computer that will later provide a survey with millimetric precision. The measurements are made without any contact and are non invasive. The time required on site is minimal, and corresponds to the time needed by the ROV to cover the zone. With the photos taken at a frame rate synchronized at 10 Hz, the ROV required two hours to perform the experiment presented in this article: The survey of the Roman shipwreck Cap Bénat 4, at a depth of 328 metres. The approach presented in this paper was developed in the scope of the ROV 3D project. This project, financed by the "Fond Unique Interministériel" (FUI) for three years, brings together two industrial partners and a research laboratory. The COMEX (COmpanie Maritime d'Expertise) coordinated this project.