

LA PHOTOGRAMMÉTRIE SOUS-MARINE



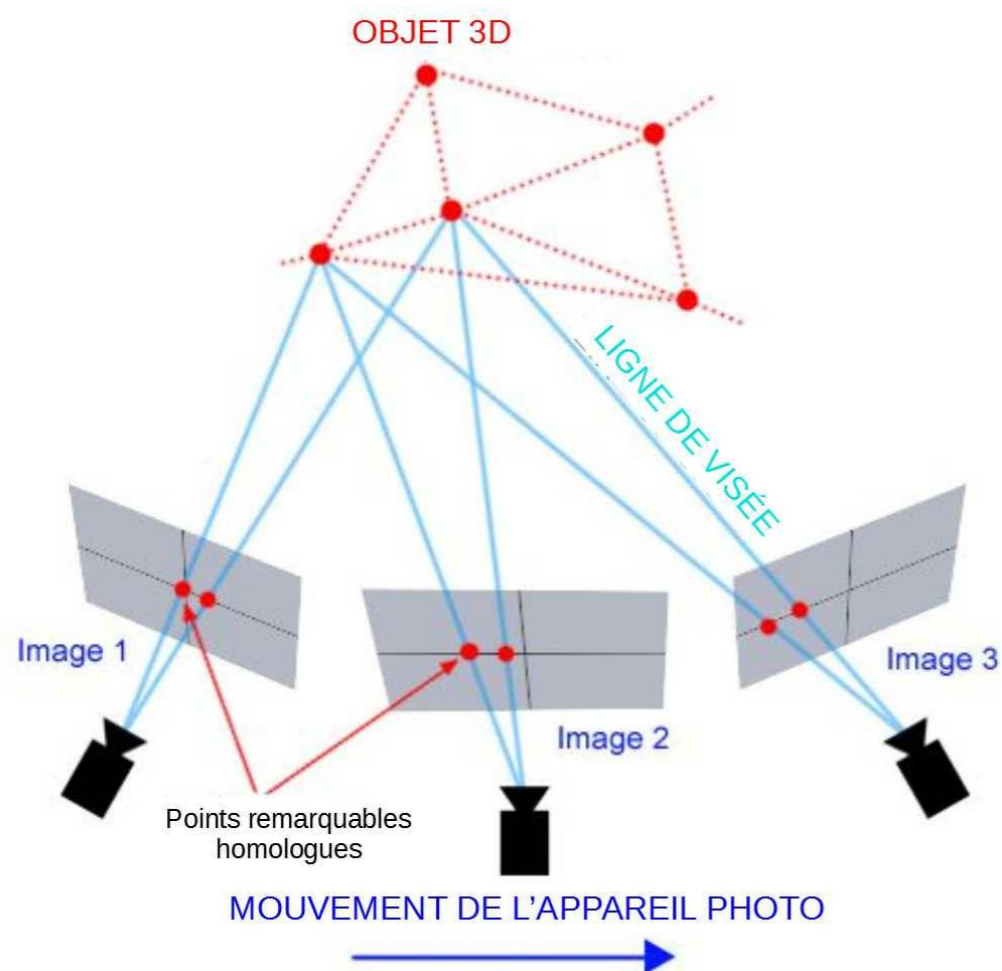
La photogrammétrie. Derrière ce terme abscons ce cache une technique utilisée couramment sur le plancher des vaches pour reconstituer des scènes en trois dimensions à partir de photographies. De nombreux domaines sont concernés par cette étonnante technologie dont notamment l'archéologie, la topographie et les visites virtuelles de monuments. Cette technique a connu des avancées fulgurantes ces dernières années grâce à l'évolution de la puissance de calcul informatique qui permet désormais d'utiliser la photogrammétrie pour cartographier les fonds marins et reconstituer en 3D des épaves englouties. Vous allez cependant voir que ce qui est relativement facile à réaliser sur terre l'est beaucoup moins sous l'eau.

Texte et photos : Arnaud Abadie

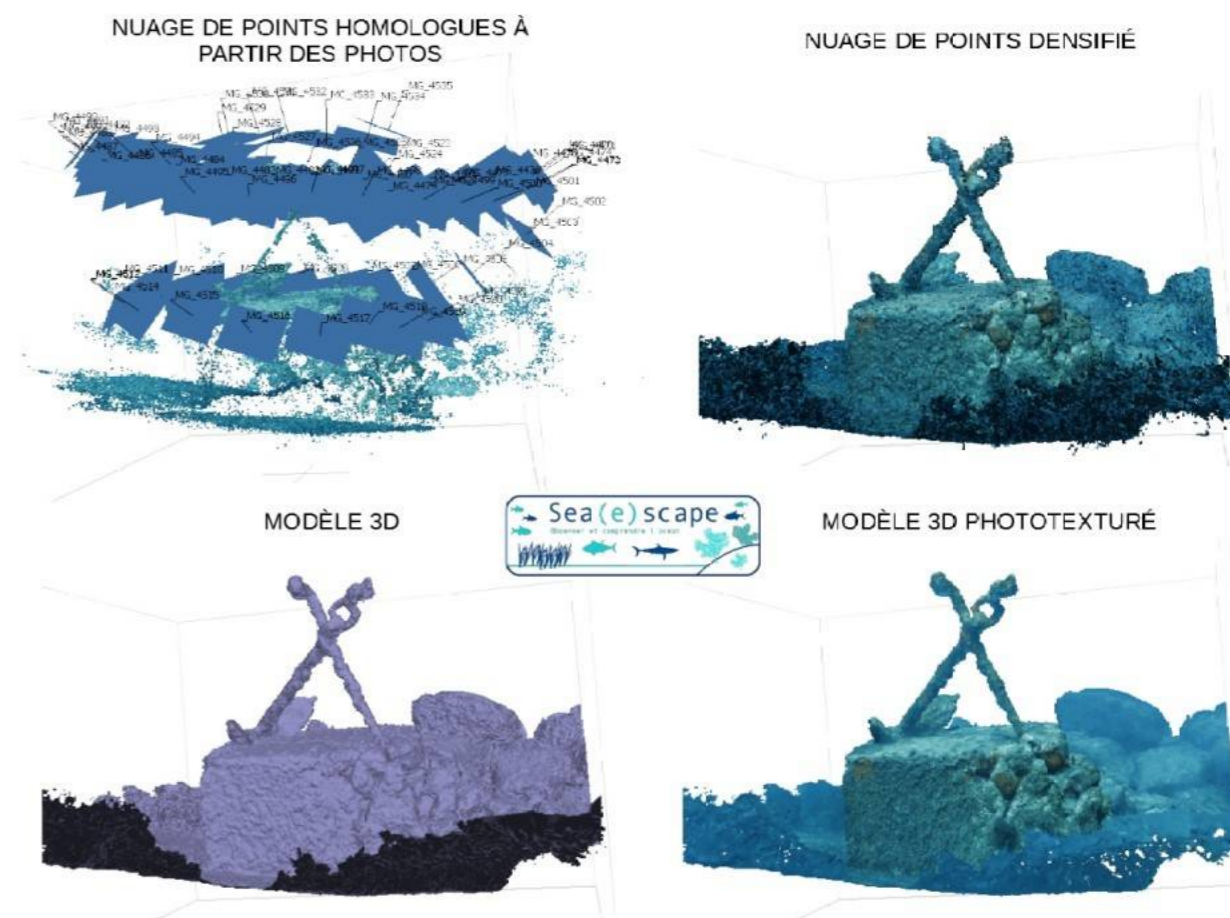
Une technique pas si récente Finalement

La photogrammétrie est une technique de mesure utilisant la parallaxe* entre différentes photographies pour reconstituer le relief de la scène photographiée (par exemple un paysage, un monument, une sculpture). En fait, la photogrammétrie fonctionne sur le même principe que notre vision stéréoscopique. Par exemple nous sommes capables de reproduire le relief d'un paysage grâce aux deux images produites par chacun de nos yeux. Pour reproduire avec des photos ce que notre cerveau réalise de façon automatique avec notre vue, des

calculs géométriques (dont certains sont très complexes) sont nécessaires. Pour faire simple, les calculs photogrammétriques se basent sur l'identification de points homologues entre deux images et une suite de calculs vectoriels permettant de replacer les points homologues dans l'espace. Pour réaliser cet ensemble d'opérations il est nécessaire de connaître les paramètres géométriques d'acquisition de chaque image (distance focale, distorsion de l'optique, etc.). Bien évidemment tous ces calculs ne sont pas réalisés à la main sur un cahier d'écolier. Des programmes informatiques compilent un ensemble d'algorithmes qui font tout le boulot.



Principe de la reconstruction d'un objet 3D par photogrammétrie.



Étapes de reconstruction photogrammétrique.

A l'issue de ce processus, un nuage des points remarquables en 3D est obtenu et permet de générer trois types de produits : un modèle numérique de terrain, une orthophotographie et un modèle 3D photo-texturé. Tous ces termes sonnent peut-être comme du Klingon pour vous (une langue gutturale de Star Trek), je m'empresse donc d'éclaircir tout ça immédiatement. Le modèle numérique de terrain, ou MNT, correspond au nuage de points remarquables. Les trois coordonnées de ces points correspondent à leur position géographique dans un repère terrestre (latitude et longitude) et leur altitude. Le MNT est couramment utilisé en topographie terrestre. Une orthophotographie est une image en vue plongeée (le plus souvent aérienne ou

satellitaire) qui intègre des corrections géométriques et radiométriques (contraste, luminosité, couleur, etc.). Dans le cas de la photogrammétrie, la correction géométrique est fournie par le MNT. Ce type de photographie est très utilisé pour l'étude spatiale et la gestion du territoire par les collectivités locales et les agences gouvernementales de l'aménagement et de l'environnement. Enfin, le modèle 3D est obtenu à partir du nuage de point qui une fois reliés formes des polygones. Le modèle 3D est ensuite texturé avec les photographies, comme un autocollant sur un jouet en plastique, fournissant ainsi un aspect photoréaliste au modèle. Ce type de représentation est couramment utilisé en archéologie (sculpture, monuments) pour reconstitué

Technique

en site en 3D dans un but pédagogique ou touristique.

Comme vous l'aurez compris, les calculs et les représentations photogrammétriques sont fortement liées aux outils informatiques. Cependant, contrairement ce que l'on pourrait penser, la photogrammétrie n'a pas vu le jour en même temps que les méthodes d'analyse informatique d'image qui pullulent depuis environ 30 ans. En fait sa première utilisation est beaucoup plus ancienne. La première personne à utiliser des photos prises sous différents angles pour réaliser des mesures de terrain sur une scène de paysage est Aimé Laussedat (officier de l'armée française) en 1849. Il nomme cette nouvelle science la « métrophotographie ». Quelques dizaines d'années plus tard, les premières vues aériennes sont réalisées en ballon par Félix Tournachon (encore un français). Il faudra cependant attendre plus d'un siècle l'émergence du calcul informatique pour pouvoir combiner la

photogrammétrie et la photographie aérienne. Aujourd'hui ces mesures sont utilisées très couramment grâce au développement fulgurant des drones aériens qui, de plus, permettent un géoréférencement** direct des photos grâce aux GPS haute précision embarqués.

Pourquoi vous détailler aussi longuement le principe de la photogrammétrie terrestre ? Tout simplement parce que la photogrammétrie sous-marine est encore une science très récente mais qui, comme vous allez le voir dans la suite, a su s'appuyer sur les avancées de la photogrammétrie terrestre et aérienne pour proposer très rapidement un large éventail d'applications.

Des vue aériennes... sous l'eau

Sous l'eau, tout est plus compliqué pour la photogrammétrie (mais pas que). Il est impossible de pouvoir s'éloigner de la scène photographiée à cause de la

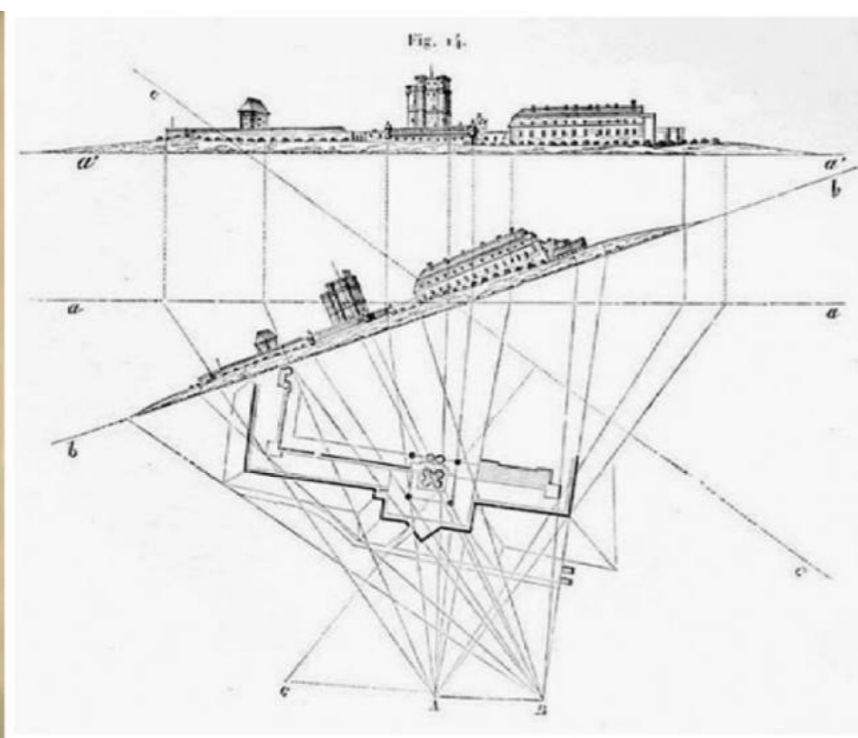
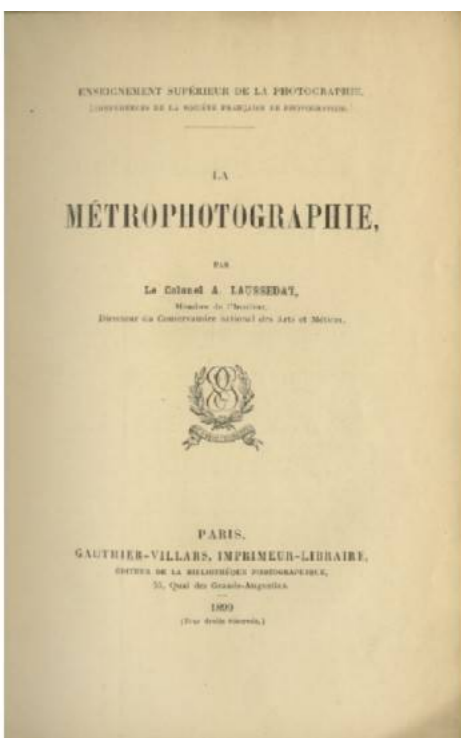
La photogrammétrie sous-marine

visibilité réduite. Si vous combinez ça à l'indice de l'eau qui entraîne un « effet de zoom » d'environ un tiers sur les images, il faut ainsi démultiplier le nombre de photos à réaliser par rapport à la même scène sur terre. Deuxième problème, les ondes GPS ne traversant pas la surface de l'eau, il est très difficile d'obtenir un positionnement direct des photographies des fonds marins.

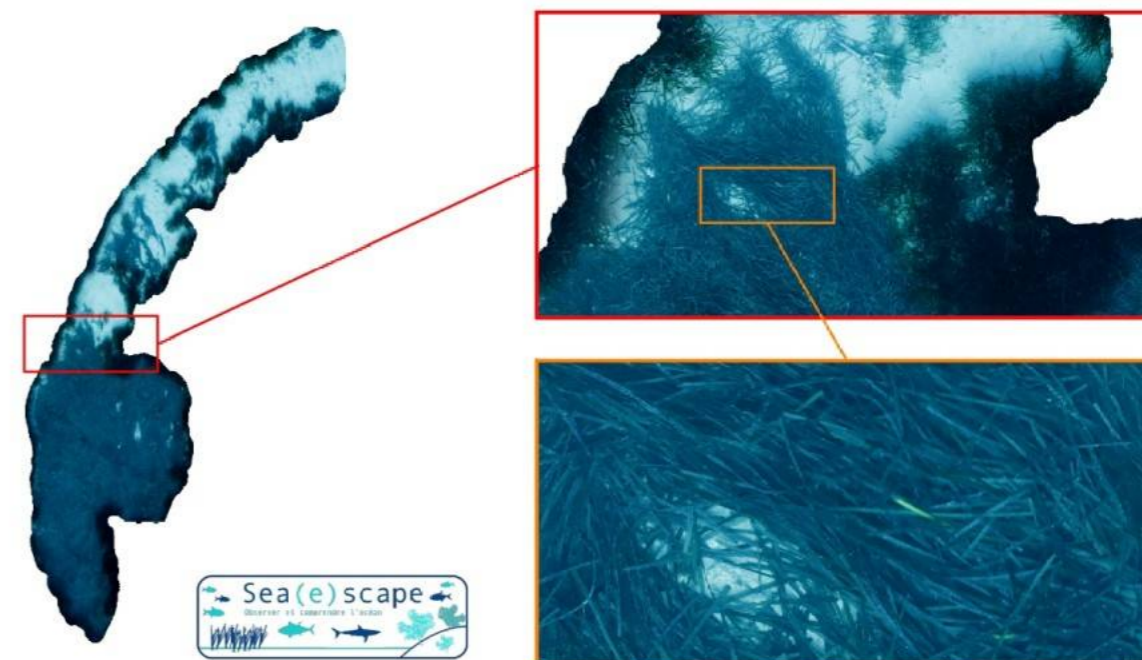
Trois options de prises de vues sont possibles pour faire de la photogrammétrie sous-marine ; photographier depuis la surface, en plongée sous-marine avec un scaphandre autonome ou avec un ROV***. Une quatrième option par drone aérien pour les habitats marins affleurant la surface de l'eau est possible, mais son utilisation est extrêmement limitée à cause de erreurs induites par la surface de l'eau lors de la reconstitution photogrammétrique. La prise de vues depuis la surface avec du matériel photographique immergés en caisson étanche permet d'obtenir un géoréférencement direct en synchronisant

l'appareil photo avec un GPS. Cette technique est limitée par la visibilité sous l'eau et sa portée est d'une dizaine de mètres en Méditerranée. En plongée sous-marine il est possible d'ajuster la distance avec la scène photographiée en fonction de la turbidité et de la résolution recherchée des produits photogrammétriques. Le gros désavantage de cette technique est que le géoréférencement des photos sera indirect (et donc peu précis). De plus le plongeur est limité en autonomie par sa réserve d'air et une scène occupant une trop grande surface nécessitera plusieurs plongées. Il est important de noter que la démocratisation des recycleurs**** ces dernières années a permis de réaliser des reconstitutions photogrammétrique sous-marine de grande ampleur. Enfin, le ROV est principalement utilisé pour réaliser de la photogrammétrie à des profondeurs où les scaphandriers n'ont pas accès (ou très difficilement).

Malgré toutes les difficultés pour réaliser des photographies en milieu



Couverture de l'ouvrage de Aimé Laussedat sur la métrophotographie, l'ancêtre de la photogrammétrie.



Une orthophotographie sous-marine d'une zone sableuse entourée par un herbier de posidonies en Corse.

Technique

marin, il est tout à fait possible, grâce à la photogrammétrie sous-marine, de produire une orthophotographie des fonds marins similaire aux photos aériennes que l'on utilise tous les jours lorsque l'on consulte Google Maps.

Des modèles 3D photoréalistes

Comme mentionné plus haut, la photogrammétrie permet d'obtenir des modèles 3D avec des textures tirées des photos. Pour obtenir un modèle 3D détaillé, il est logiquement obligatoire de prendre la scène sous toutes les coutures afin d'avoir des points homologues sur toutes les faces de l'objet à modéliser. Cet aspect est commun à la photogrammétrie terrestre et sous-marine. Par exemple, si un drone aérien prend des photos au-dessus d'un bâtiment de forme cubique, la reconstruction photogrammétrique permettra d'obtenir des points remarquables sur le toit et le sol autour mais pas sur les façades. S'il est possible sur terre de faire facilement des photos sous plusieurs angles, avec un drone ou de puis depuis le sol par exemple, sous l'eau tout est plus compliqué. Ainsi, si la partie immergée d'une digue doit être modélisée en 3D, des photos prises depuis la surface peuvent nécessiter des photos supplémentaires réalisées en plongée sous-marine. De même, la modélisation d'une épave de bateau imposante peut entraîner des variations de profondeur importantes et un nombre d'immersions conséquent. D'une façon générale, plus la forme de l'objet photographié est complexe, plus le nombre de photos composant sa modélisation sera important.

En plus des aspects logistiques et pratiques, les limites de la photogrammétrie sous-marine ne s'arrêtent pas là. La lumière étant absorbée dans l'eau dès les premiers mètres de profondeur, un puissant éclairage d'appoint est requis pour ne pas avoir des photos, et donc un modèle 3D, en cinquante nuances de bleu (et un peu

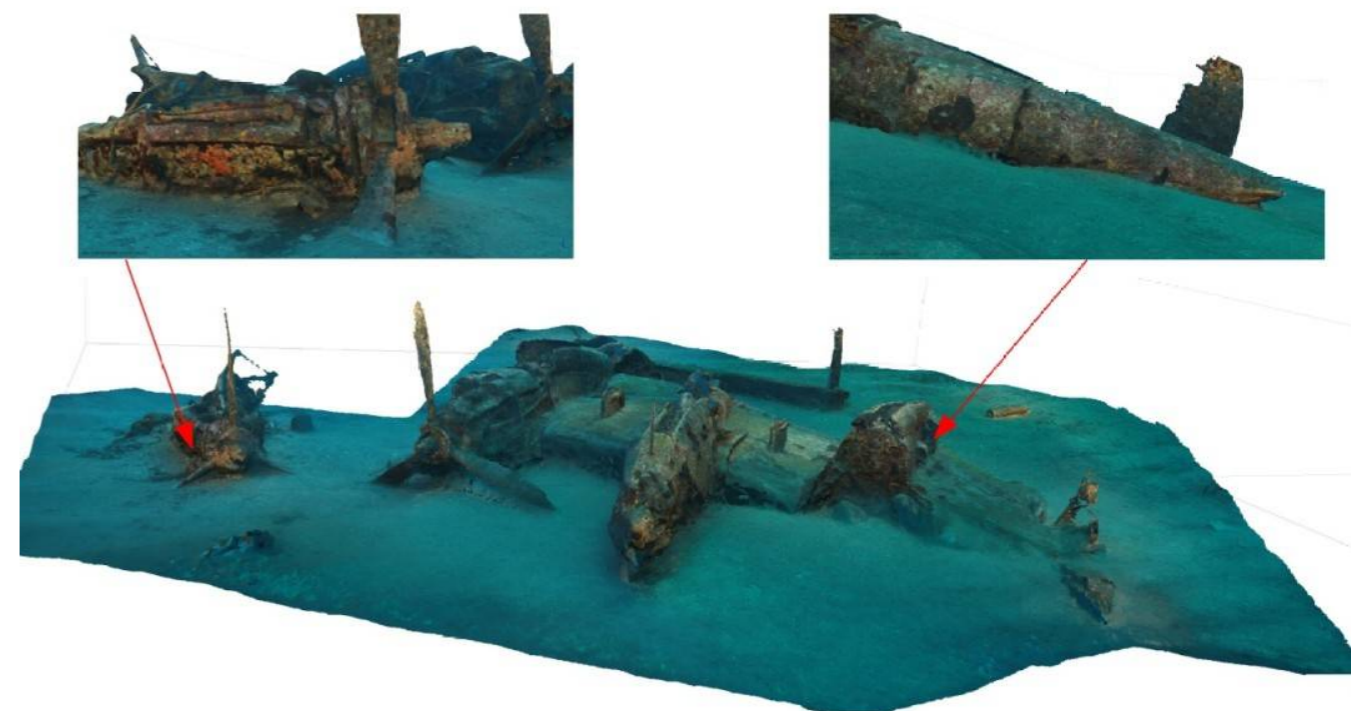
de vert). Se pose alors le problème de l'autonomie de cette source de lumière artificielle (que cela soit un flash externe ou un phare).

Vous l'aurez compris, la reconstitution d'une scène sous-marine en 3D est semée d'embûches et nécessite une certaine préparation avant même de commencer à prendre la première photo. Malgré tous ces obstacles, vous allez voir dans la suite que les applications de la photogrammétrie sous-marine sont nombreuses et parfois surprenantes.

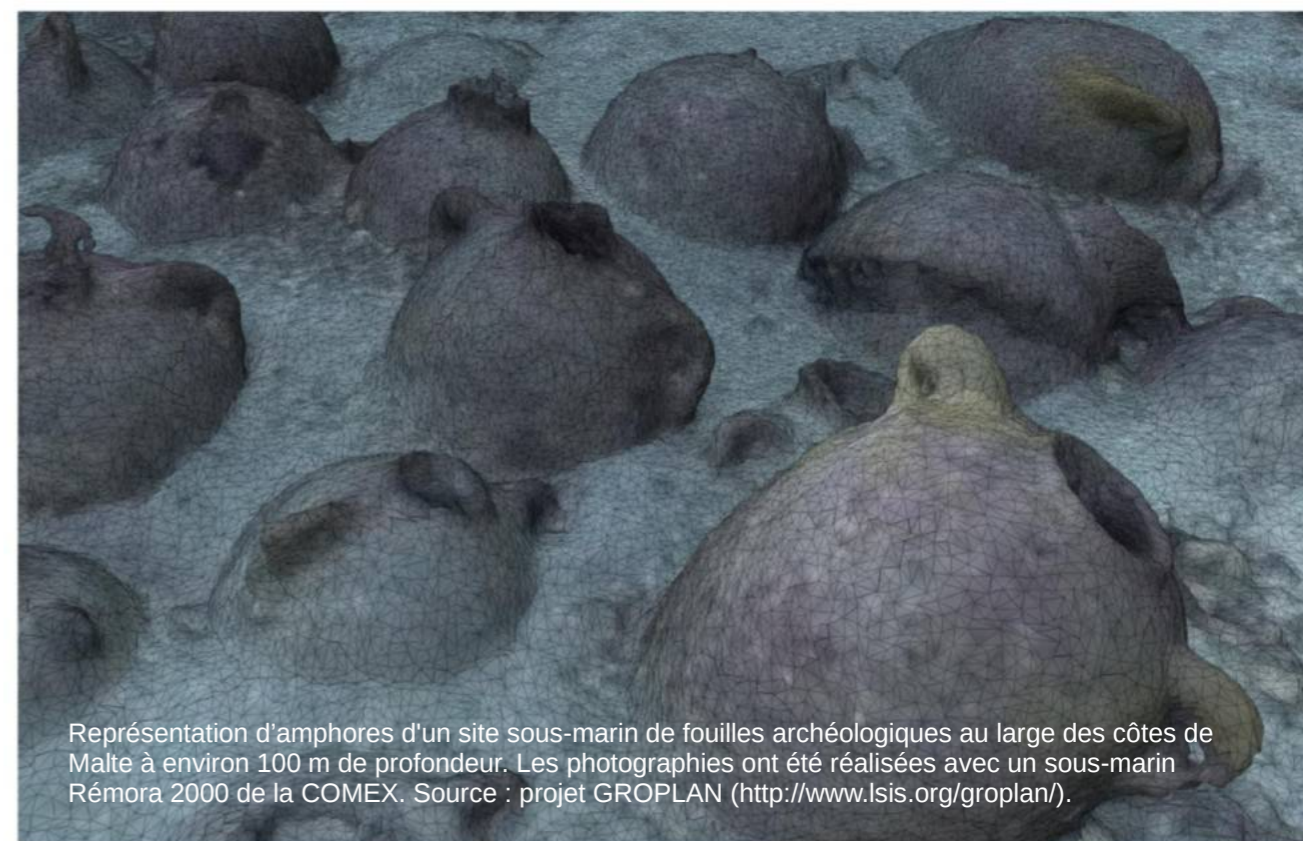
De nombreuses applications...

Toute cette ébauche de technique photographique, d'analyse d'images et de moyens sous-marins est fort sympathique et intéressante mais en quoi est-ce utile ? L'une des premières applications sous-marine de la photogrammétrie a avoir émergé (si vous me permettez l'expression) est l'étude des sites archéologiques subaquatiques. Cette technique est couramment utilisée sur les sites archéologiques terrestres afin d'avoir une représentation réaliste de la disposition des objets et des structures avant d'éventuels déplacements durant les fouilles. Sous l'eau, cette reconstitution du site de fouilles est primordiale du fait de l'intrusivité des techniques de fouilles (récupération des objets par succion du sédiment) et de la possible dégradation des structures - comme celle d'une épave antique en bois - qui peuvent être rapidement détruites par leur exposition à l'oxygène ou aux courants marins. En archéologie sous-marine les orthophotographies issues de la photogrammétrie permettent d'obtenir une carte précise du site fouillé tandis que le modèle 3D permet d'appréhender plus facilement la complexité des assemblages d'objets à récupérer et la configuration spatiale des structures. Certaines épaves étant particulièrement profondes, les levés photogrammétriques sont souvent réalisés par des ROV.

La photogrammétrie sous-marine



Représentation 3D de l'épave du P38, un chasseur de la Seconde Guerre Mondiale, reposant par 38 m dans la baie de La Ciotat. Les photographies (environ 800) pour la reconstitution photogrammétrique ont été réalisées en plongée. Source : Seaviews.

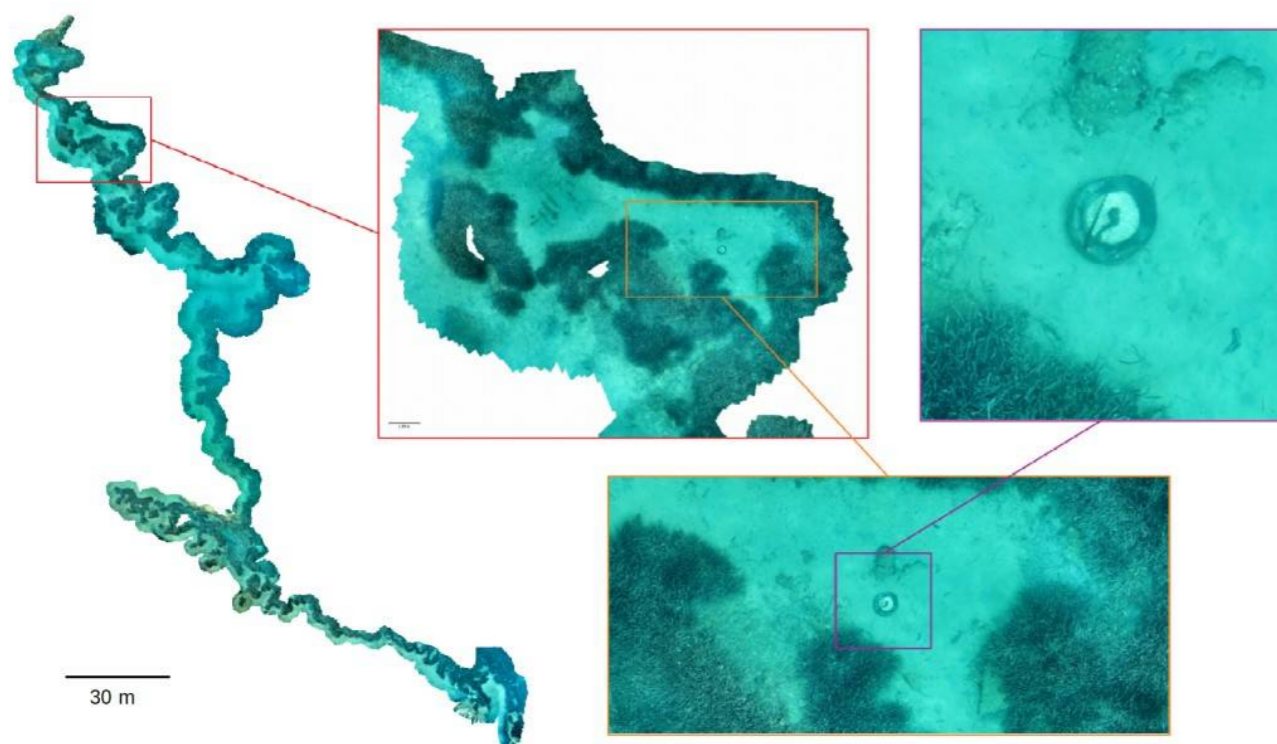


Représentation d'amphores d'un site sous-marin de fouilles archéologiques au large des côtes de Malte à environ 100 m de profondeur. Les photographies ont été réalisées avec un sous-marin Rémora 2000 de la COMEX. Source : projet GROPLAN (<http://www.lsis.org/groplan/>).

Des utilisations plus « industrielles » de la photogrammétrie existent également dans le domaine de l'inspection sous-marine. C'est notamment le cas pour le contrôle de conduites sous-marines profondes comme celles situées à proximité des plateformes pétrolières, de pipes transportant du gaz et du pétrole, et des câbles téléphoniques. A l'instar de l'archéologie sous-marine, la photogrammétrie permet d'obtenir une vision réaliste d'un site et de pouvoir réaliser des mesures précises. Des levés photogrammétriques sont également réalisés pour localiser les nodules polymétalliques**** sur les plaines abyssales par plusieurs milliers de mètres de profondeur. Du fait de l'importante profondeur (plusieurs centaines voir plusieurs milliers de mètres de profondeur), ces mesures sont réalisées par des ROV, lorsque la zone de mesure est restreinte, et par des engins tractés ou des drones sous-marins pour de larges surfaces à cartographier.

Les applications les plus populaires de la photogrammétrie sont celles dédiées à la pédagogie, à l'enseignement ou au tourisme. Il est toujours surprenant de pouvoir faire la visite virtuelle d'un monument sur un écran ou avec un casque de réalité virtuelle. Ce type d'utilisation des modèles 3D photo-texturés issus de la photogrammétrie est de plus en plus courant pour les monuments historiques par exemple. En ce qui concerne ce qui se trouve sous l'eau (épaves, ruines englouties), la photogrammétrie est encore peu utilisée même si l'on commence à voir des reportages des modélisations 3D photogrammétriques.

Enfin, l'une des utilisations les plus courantes de la photogrammétrie sous-marine est la cartographie des habitats et l'étude de la distribution des organismes marins. Les orthophotographies sous-marines, tout particulièrement, permettent de cartographier la limite des biocénoses marine avec précision et d'identifier



Cartographie de la limite des herbiers de posidonie dans la calanque du Mugel (La Ciotat) par photogrammétrie géoréférencée. Source : Seaviews.

certain habitats impossibles à détecter avec les techniques classiques (acoustique, photo aériennes). La photogrammétrie est actuellement principalement utilisée pour le suivi des prairies sous-marines, que ce soit celles de Méditerranée comme la posidonie et la cymodocée ou celles des eaux tropicales. Les récifs coralliens sont également propices au suivi par photogrammétrie du fait de leur faible profondeur et de la clarté de l'eau. La limite des habitats marins n'est pas la seule information extraite des orthophotographies sous-marines. Leur résolution millimétrique permet de détecter et d'identifier les organismes vivants sur le fond (par exemple les holothuries, les oursins, diverses algues). Les traces des impacts anthropiques (c'est-à-dire des activités humaines) sont également visibles comme les déchets et les traces de destruction mécanique des herbiers sous-marins ou des récifs coralliens. La modélisation 3D par photogrammétrie, quant à elle, est employée pour étudier les espèces marines présentant une structuration spatiale complexe comme les gorgones, le corail rouge ou certaines espèces de coraux tropicaux.

Comme vous pouvez le voir les applications de la photogrammétrie sous-marine sont déjà nombreuses bien que cette discipline soit relativement récente. De nouvelles utilisations vont émerger dans les prochaines années et la qualité des produits photogrammétriques va également s'améliorer. Malgré ces perspectives optimistes, des verrous techniques restent encore à lever pour augmenter l'efficacité de l'acquisition et du traitement des données photogrammétriques.

...et autant de défis techniques à relever

Imaginez les fonds marins d'une baie entière représentés comme les images satellites de Google Maps mais

avec une mosaïque de photos sous-marine... Et bien cela est actuellement impossible. Pourquoi? A cause de la visibilité limitée sous l'eau et du grossissement induit par l'indice de réfraction de l'eau, il faudrait réaliser plusieurs centaines de milliers (voire plusieurs millions) de clichés sous-marins pour une surface de quelques kilomètres carré. Si la prise d'un si grand nombre de photos est certainement possible, bien que complexe et coûteux, leur traitement photogrammétrique demanderait une puissance de calcul faramineuse dont nous ne disposons pas actuellement. Le meilleur support cartographique pour de telles échelles spatiales est actuellement l'acoustique sous-marine. A ce jour, si la photogrammétrie sous-marine n'est pas adaptée l'étude de grandes surfaces sous-marines, il est certain, qu'avec le développement rapide des systèmes de mesure sous-marins autonomes et l'augmentation constante de la puissance des ordinateurs, que cela sera possible au cours des prochaines décennies.

Le second défi technique concerne les sujets en mouvement. Comme mentionné plus haut, il est relativement facile de réaliser un modèle 3D par photogrammétrie d'un organisme marin immobile. Faire de même pour une espèce mobile - comme les poissons - est au mieux extrêmement compliqué. Souvenez-vous, la reconstitution d'un sujet en 3D par photogrammétrie nécessite l'utilisation de points homologues entre des photos qui se superposent fortement (idéalement à 80%). Cela implique donc qu'il faudrait prendre simultanément et instantanément le poisson sous tous les angles alors qu'il est en train de nager. Une technique difficile à mettre en place, je pense que vous en conviendrez.

Enfin, il reste l'éternel problème du positionnement géographique sous l'eau qui est primordial pour réaliser des cartographies précises par

Technique

photogrammétrie. Comme mentionné au début de cet article, les ondes GPS ne traversant pas la surface de la mer, il est nécessaire de contourner le problème en couplant un appareil photo à un GPS depuis la surface. Des systèmes de positionnement sous-marins existent également et sont basés sur l'acoustique. Cet équipement sous-marin consiste en un émetteur envoyant un signal acoustique à un récepteur. Le temps que met l'onde acoustique à parcourir l'intervalle entre l'émetteur (immobile) et le récepteur (mobile) permet d'en calculer la distance. Petit (gros) problème : si ce système est très précis dans un référentiel relatif à la zone cartographiée (précision centimétrique), il l'est beaucoup moins dans un référentiel terrestre (dit absolu). Ainsi, pour passer d'un référentiel relatif à absolu, il est nécessaire de positionner l'émetteur dans un repère terrestre, c'est à dire avec des coordonnées géographiques. Et pour cela il faut un GPS capable de positionner précisément l'émetteur qui est... sous l'eau. C'est le serpent qui se mord la queue.

Le mot de la Fin

Le nombre d'applications de la photogrammétrie sous-marine semble infini. Les surfaces cartographiées de la sorte sont de plus en plus étendues et même les abysses sont explorées de cette façon. Les gestionnaires du littoral ont de plus en plus recours à la photogrammétrie pour faire un état des lieux des habitats sensibles et pour suivre leur évolution. Il est à prévoir que dans quelques années cette technique remplacera petit à petit les méthodes plus anciennes qui sont moins précises et moins efficaces.

Glossaire

*Parallaxe : impact du changement d'incidence de l'observation. Par exemple lorsqu'un observateur se déplace tout en continuant d'observer un objet.

**Géoréférencement : action de définir les coordonnées spatiales d'une entité spatiale et de lui appliquer une transformation.

***ROV : remote operated vehicle. Le plus souvent un véhicule sous-marin relié à un navire avec câble permettant de le diriger et d'obtenir un retour vidéo.

****Recycleur : type de matériel de plongée permettant de recycler l'air expiré en fixant le CO₂ avec une cartouche de chaux. Cet appareil respiratoire permet notamment d'augmenter la durée de plongée et de ne pas émettre de bulles, ce qui favorise l'approche de certains organismes marins.

*****Nodules polymétalliques : concrétions rocheuses principalement composées de manganèse et d'hydroxyde de fer. Les nodules reposent sur les fonds marins par plusieurs milliers de mètres de fonds à proximité des chaînes hydrothermales.

Pour en savoir (beaucoup) plus

Abadie A., Boissery P., Viala C. (2018) Georeferenced underwater photogrammetry to map marine habitats and submerged artificial structures. *The Photogrammetric Record* 33 (164): 448-469

Drap P., Seinturier J., Hijazi B., Merad D.D., Boï J.M., Chemisky B., Seguin E., Long L. (2015) Le projet ROV 3D : relevé sous-marin en grande profondeur par photogrammétrie. Applications à l'archéologie sous-marine. *Revue XYZ* 142 : 28-40 (pdf)

Kalantari M., Kasser M. (2008) Photogrammétrie et vision par ordinateur. *Revue XYZ* 117 : 49-54 (pdf)

Kwasnitschka T., Köser K., Sticklus J., Rothenbeck M., Weiss T., Wenzlaff E., Schoening T., Triebe L., Steinführer A., Devey C. (2016) DeepSurveyCam—a deep ocean optical mapping system. *Sensors* 16(2): 164



La qualité des rendus photogrammétriques dépend grandement de celle des photographies qui les composent. Il est donc important de gérer parfaitement la netteté, l'exposition et l'éclairage des photos sous-marines qu'elles soient réalisées en plongée sous-marine ou depuis la surface.