

Sea(s)cape

Science et photographie sous-marine

La photogrammétrie sous-marine

Les récifs artificiels

Le cycle de l'eau en Corse

La baudroie abyssale

Portfolio : portraits sous-marins

*L'écologie des
paysages
sous-marins*

N°2

Édition

Arnaud Abadie

arnaud.abadie@seaescape.fr

Ils ont participé à ce numéro : Sébastien Ameeuw, Delphine Fraysse, Célia Koellsch, Matthieu Lapinski, François Remy

Vous souhaitez partager vos connaissances sur les océans et publier un article dans Sea(e)scape ? Une seule adresse :

contact@seaescape.fr

Retrouvez plus d'articles et de photos sur

www.seaescape.fr



Ce document est la propriété de Sea(e)scape et de Arnaud Abadie. Il est partagé sous la licence Creative Commons – Attribution-NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International. Il ne peut donc pas être modifié ni utilisé à des fins commerciales.

La totalité des photos publiées dans Sea(e)scape sont la propriété de leur auteur. Toute reproduction et utilisation est interdite.

Édito

Développer notre sens critique

Entre le premier et le second numéro de ce webzine il s'est passé beaucoup de choses dans le monde. Je parle, bien entendu, de la pandémie du COVID19 qui a poussé de nombreux pays au confinement, dont la France.

J'écris ces lignes le 24 mai 2020 alors que le déconfinement se déroule depuis deux semaines dans notre pays. Ces deux mois de restriction de déplacements ont été révélateur de notre rapport à l'environnement. Nos contacts avec les espaces naturels, déjà quasiment inexistant chez la plupart d'entre-nous, sont devenus interdits. C'est bien évidemment le cas pour les espaces marins et sous-marins.

Je ne suis ni virologue ni décisionnaire et je suis donc incapable de juger de la pertinence, ou non, des mesures qui ont été prises. Mon opinion n'a donc aucun intérêt.

En revanche je trouve intéressant de se pencher sur la perception que nous avons eu de la « nature » durant le confinement. Plus particulièrement, ce sont les fantasmes qu'ont suscité la (faible) diminution de nos impacts sur l'environnement dont je vais brièvement parler dans ces lignes.

Nous avons ainsi imaginé qu'en ralentissant la destruction méthodique des écosystèmes de la planète pendant quelques mois, les espaces naturels retrouveraient leur état de conservation d'avant l'ère industrielle. Si la plupart des des systèmes naturels sont relativement résilients, il leur faut bien plus de temps

pour récupérer de nos sévices. A mon sens cette conception collective erronée a pour origine deux facteurs : les buzz environnementaux relayés par les médias et les réseaux sociaux sans aucun regard critique ; et le manque de connaissance des processus régissant notre climat et la répartition des organismes vivants.

S'il est difficile de supprimer la superficialité inhérente au format des réseaux sociaux, je pense qu'il est faisable d'inciter le plus de monde possible à développer un regard critique sur les infos déversées en flux continu. Bien évidemment, le développement d'un sens critique sans connaissances est impossible (même si la mode actuelle est que tout le monde s'improvise expert dans un domaine).

C'est sur ce levier que Sea(e)scape tente d'agir en vous fournissant des

informations poussées et objectives sur le milieu marin.

Dans ce second numéro c'est encore une grande variété de thèmes qui vous attend : conservation, biologie, océanographie, technique de mesure, écologie. J'ai également le plaisir de vous annoncer la participation de deux contributeurs de qualité dans ce numéro : Célia Koellsch avec son excellent article sur les baudroies abyssales, et Sébastien Ameeuw, champion de France en titre de photographie sous-marine, qui nous offre un magnifique portfolio sur la macro-photographie animalière.

Merci de lire Sea(e)scape et bienvenue dans votre déconfinement sous-marin de l'esprit !

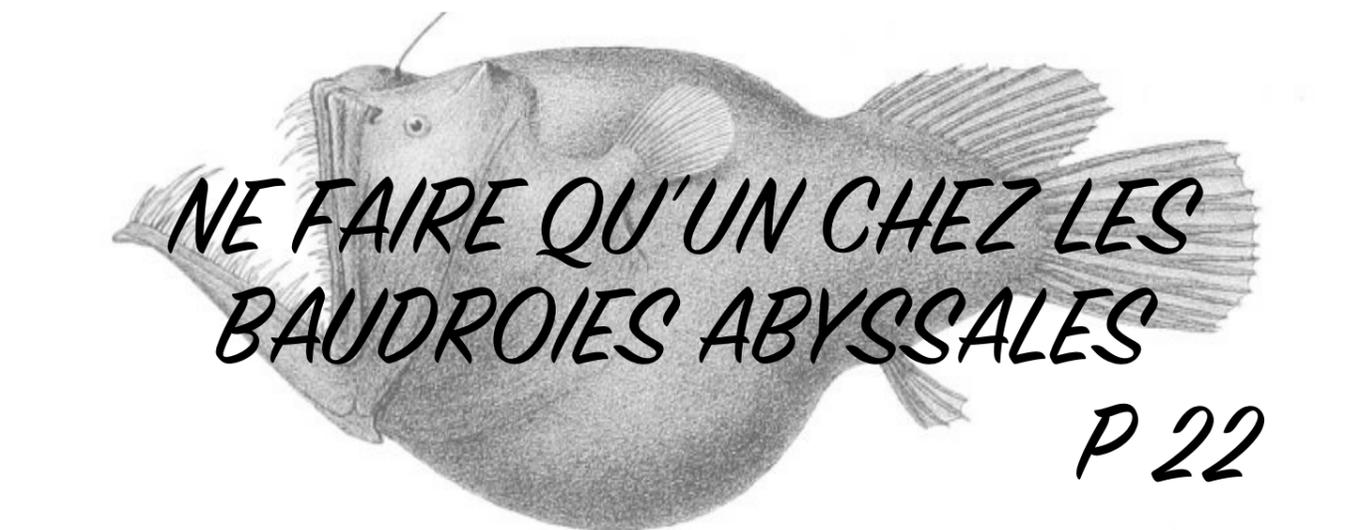
Arnaud Abadie



Sébastien Ameeuw (au second plan) et votre serveur (au premier plan) avant une plongée durant la période de déconfinement.

Photo : Delphine Fraysse

Sommaire



An underwater photograph showing a dense field of purple and pink branching coral. Small fish are visible swimming in the blue water above the coral. The scene is brightly lit, likely from an artificial light source, creating a vibrant and detailed view of the marine ecosystem.

L'ÉCOLOGIE DES PAYSAGES SOUS-MARINS

Contrairement à ce que son nom, plutôt abstrait, pourrait faire penser, l'écologie du paysage est une discipline scientifique à part entière, créée il y a plus de 75 ans. Cette spécialité de l'écologie permet d'étudier la structure des biotopes terrestres et marins, et la répartition des organismes vivants afin de fournir aux gestionnaires des espaces naturels et anthropisés une meilleure compréhension des processus en jeu. Cependant, si cette discipline scientifique est couramment utilisée en milieu terrestre pour des enjeux de conservation, il en est tout autrement en milieu marin où les informations sont beaucoup plus difficiles à obtenir. De ce fait, l'écologie du paysage en milieu marin reste encore peu appliquée dans un but de gestion et de conservation des écosystèmes océaniques.

Texte et photos : Arnaud Abadie

Pas plus compliqué qu'une photo de vacances

Le concept de l'écologie du paysage est né dans les années 1930 et s'est développé en Europe et en Amérique du Nord après la Seconde Guerre Mondiale jusqu'à être théorisé dans les années 1970. L'écologie du paysage est une discipline scientifique de l'écologie proche de la biogéographie*. Cette spécialité s'intéresse tout particulièrement à l'hétérogénéité des habitats (qu'ils soient naturels ou artificiels) et à son influence sur le fonctionnement des écosystèmes.

Il est très facile de comprendre le concept scientifique de paysage (landscape en anglais) en regardant n'importe quel panorama photographique terrestre. Sur le cliché ci-dessous, par exemple, l'alternance entre des zones urbaines, de couverts végétaux de

différentes densités et d'une zone littorale sont immédiatement identifiées par tout le monde. Je suis d'ailleurs sûr que vous avez reconnu le campus de Luminy au milieu des calanques avec en arrière plan la ville de Marseille ! Comme vous allez le voir, l'écologie du paysage s'appuie sur l'analyse quantitative de la structure de ces alternances d'habitats.

Théorie paysagère

Avant de mettre la tête sous l'eau il est nécessaire d'avoir à l'esprit quelques notions fondamentales de l'écologie du paysage terrestre. Classiquement, trois aspects du paysage sont étudiés dans cette spécialité de l'écologie : sa structure, sa fonction et son évolution. La structure d'un paysage est assimilée à une mosaïque de taches ou « patchs » de types d'habitat. En fait c'est une espèce de patchwork sauf que chaque motif est irrégulier et représente un biotope**



La mosaïque si particulière d'un paysage composé d'une alternance de champs, de routes, de bois et d'habitations. Cette vue aérienne de la campagne du sud de l'Allemagne illustre parfaitement le concept scientifique de la structure paysagère.

La compréhension scientifique d'un paysage se base sur l'analyse que nous faisons tous automatiquement en regardant la photo d'un panorama. Instinctivement nous identifions les zones naturelles, urbaines et les différences de couvert végétal. Ici le campus de Luminy en périphérie de la ville de Marseille.

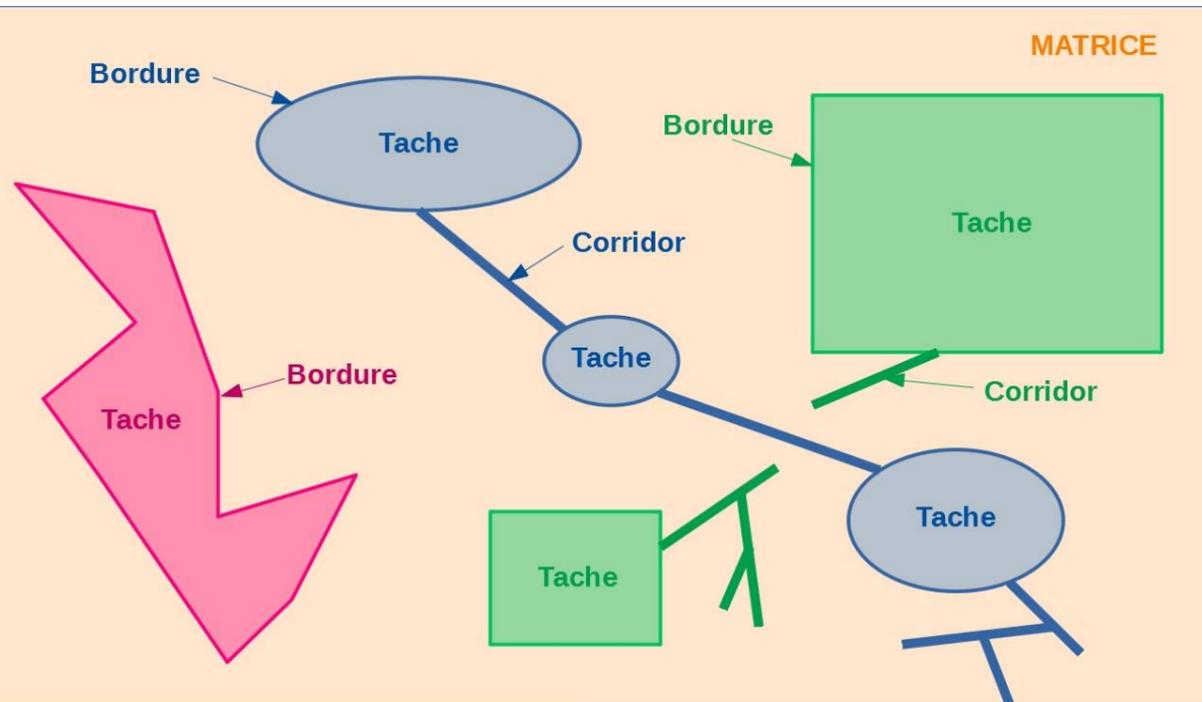


particulier. La parfaite illustration de ce concept est la succession de champs séparés par des haies et des habitations comme sur la photo aérienne ci-dessous de la campagne du sud de l'Allemagne.

En conceptualisation scientifique cela se traduit par différents termes renvoyant aux différents éléments constituant le paysage. La matrice correspond au « fond » sur lequel viennent s'agencer les différents éléments. Par exemple sur la photo du dessus la matrice est formée par les champs. La tache est l'unité du paysage. Elle représente une entité avec des propriétés biologiques et physico-chimiques particulières. Si nous retournons une nouvelle fois à notre paysage allemand ce sont les zones boisées, les habitations et les lacs. L'interface tache/matrice ou tache/tache est appelée bordure. Nous verrons plus tard que ces bordures jouent un rôle primordial dans la distribution des

espèces au sein des paysages. Enfin, le corridor constitue une bande étroite reliant (ou pas) des taches, de même nature ou de nature différente, entre elles. Par exemple les routes entre les zones urbaines sont des corridors, comme les rivières entre les lacs. Tout comme les bordures, les corridors jouent rôle déterminant dans la répartition des organismes vivants.

L'étude la structure du paysage passe par la réalisation de photographies aériennes servant de support à la création de cartographies des différents patchs avec des systèmes d'information géographique (SIG***). L'analyse quantitative du paysage est ensuite faite dans des logiciels spécifiques calculant les différentes variables telles que le nombre de taches selon leur type, la longueur des bordures ou la distance moyenne entre les taches. Des dizaines d'indices permettant de décrire la structure et la fonction du paysage



Conceptualisation schématisée de la constitution d'un paysage permettant une analyse spatiale quantitative d'un paysage.

existent et sont inclus dans ces logiciels.

Après avoir vu à quoi correspond la structure, intéressons-nous au second pilier de l'écologie du paysage : la fonction. Comme nous parlons ici d'une spécialité de l'écologie, elle doit donc renseigner sur les interactions entre les organismes vivants et leur habitat. La fonction du paysage renvoie donc à la distribution des espèces en fonction de sa structure. Les espèces vont ainsi, soit être inféodées à un type de tache particulier, soit circuler entre les différentes taches de la mosaïque du paysage en passant par la matrice ou par les corridors. Ces derniers peuvent d'ailleurs avoir plusieurs fonctions selon les caractéristiques de l'espèce voire de l'individu (mobilité, taille, âge, état de santé). Les corridors peuvent ainsi permettre la circulation mais aussi agir comme filtre, comme barrière ou bien comme un véritable habitat. Les bordures, quant à elles, constituent le lieu où les interactions entre organismes vivants sont

les plus nombreuses. Par exemple, la limite entre un champ et une forêt représente pour certaines proies la démarcation entre une zone à découvert et un abri les protégeant de certains prédateurs. Les bordures sont aussi le lieu de nombreux processus biogéochimiques**** influençant également la distribution des espèces.

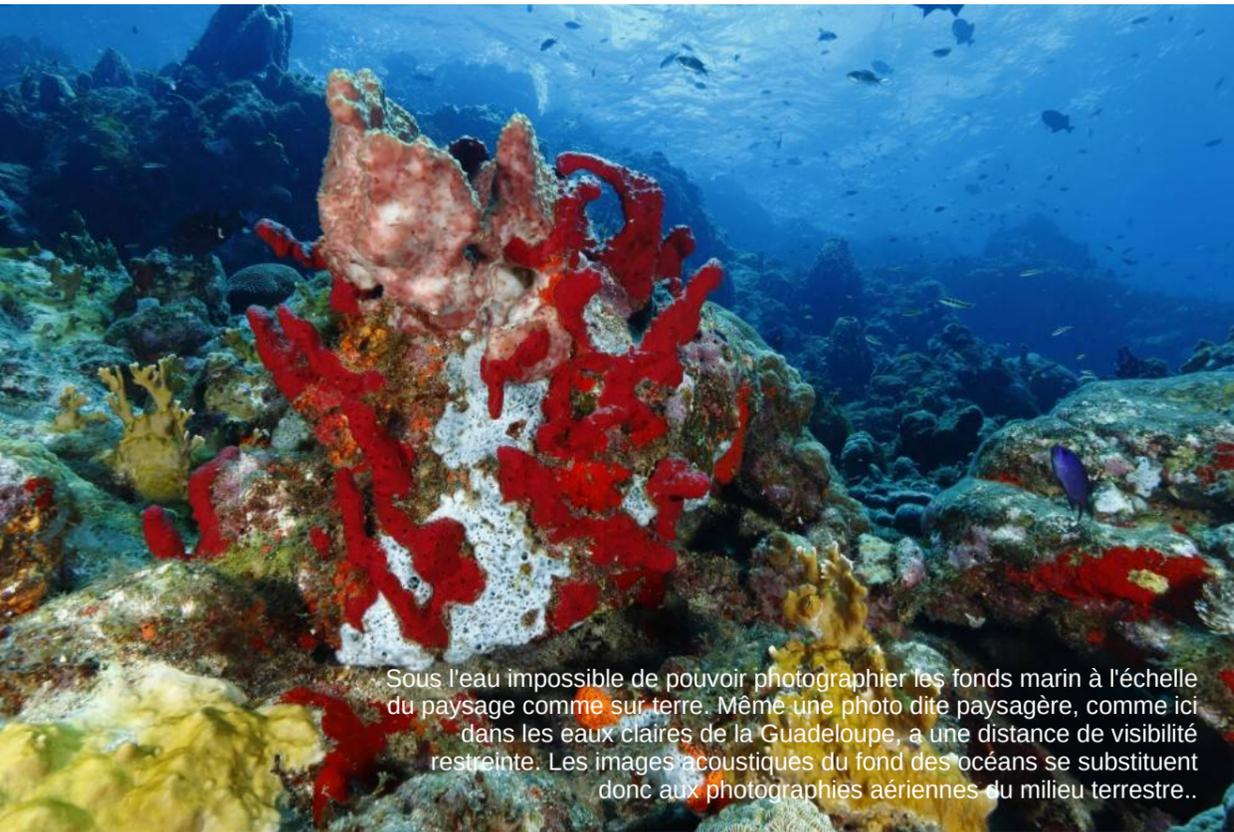
L'étude de la fonction du paysage implique des observations de terrain de la distribution et des déplacements des organismes vivants. Chaque espèce, voire chaque population, possède des caractéristiques propres de dispersion et de mouvement au travers de la structure du paysage. Ces données quantitatives permettent de déterminer si les habitats naturels remplissent « correctement » leur fonction. Elles sont implémentées dans les systèmes informatiques d'analyse afin d'étudier spatialement les interactions entre les espèces et la structuration du paysage.

Enfin, le dernier pilier de l'écologie du paysage concerne l'évolution de la structure et de la fonction paysagère. L'aspect le plus étudié de l'évolution est la fragmentation des habitats c'est à dire l'augmentation du nombre de taches d'un biotope donné pour une diminution de sa superficie totale. La fragmentation des habitats naturels peut mener à la réduction des populations de certaines espèces en augmentant la distance entre les patches et en diminuant leur territoire. L'étude de l'évolution du paysage est très intéressante dans un but de conservation. Il permet, pour une espèce donnée ou pour un groupe d'organismes, de déterminer si les mesures de protection ont permis une amélioration du fonctionnement de l'écosystème. La modélisation des processus écosystémiques au sein du paysage fournit une projection dans le futur afin de disposer de plusieurs scénarios de gestion.

Transfert de la théorie au milieu marin...

Avec ces quelques (nombreux?) éléments en tête, il est maintenant temps de regarder ce qui se passe dans les océans. La première étude des paysages sous-marins (seascape en anglais) date des années 1950 et s'intéressait aux caractéristiques des taches sableuses (intermattes****) au sein des herbiers de posidonies de Méditerranée française. Une seconde étude sur le même sujet a été réalisée sur les herbiers sous-marins des Caraïbes au milieu des années 1970. Comme vous l'aurez peut-être remarqué, ces premières études, bien qu'assimilables à des approches paysagères, ont eu lieu en parallèle de la théorisation de l'écologie du paysage en milieu terrestre..





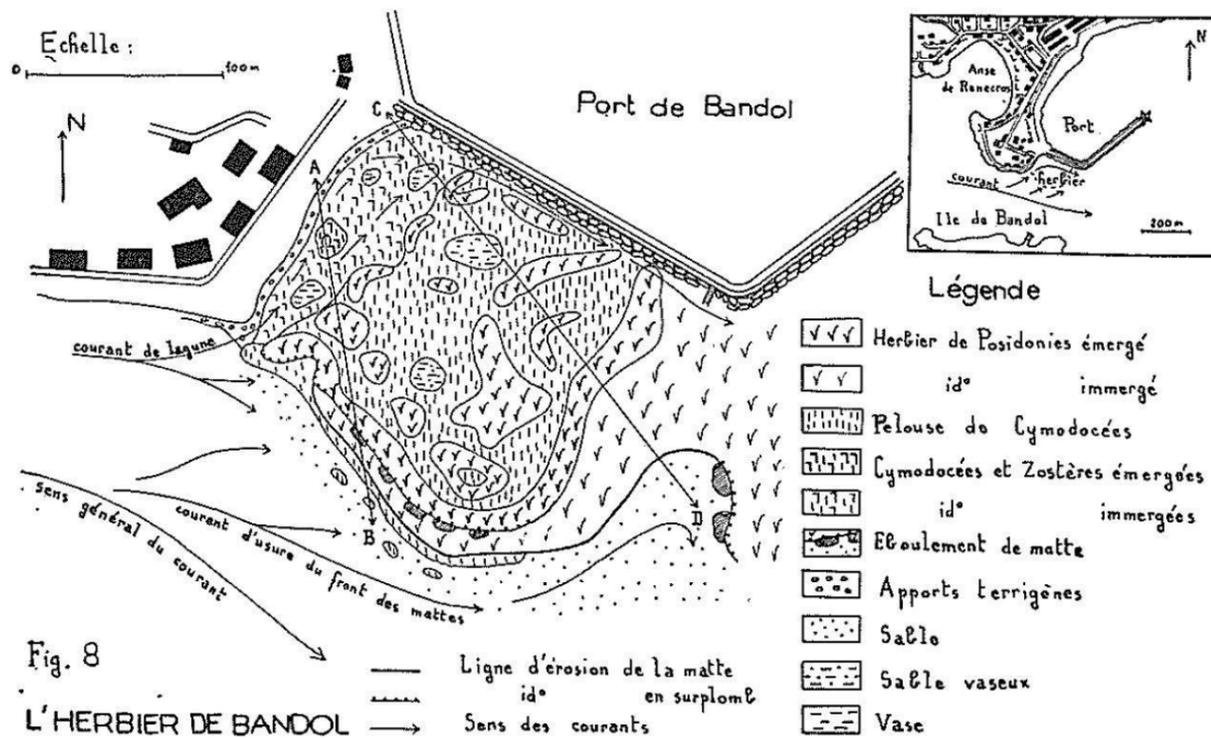
La théorie de l'écologie du paysage a été transférée au milieu marin dans les années 1980. Une fois encore c'est principalement la structure des paysages formés par les prairies sous-marines qui est principalement étudiée (en Australie et aux États-Unis). Les bancs de moules de la côte Est des États-Unis sont également analysés avec la méthode paysagère. Dans ces travaux précurseurs, les concepts et les métriques du milieu terrestre sont directement transférés au paysage sous-marin étudié. L'étendue spatiale de ces travaux est cependant restreinte du fait des capacités limitées des techniques de cartographie des fonds marins de l'époque. L'émergence des techniques acoustiques de cartographie des habitats marins à la fin des années 1990 a permis de réaliser des analyses à

très grande échelle spatiale de la structure des paysages côtiers. La haute résolution des cartes actuelles fournit une détection accrue des taches d'habitat marin de surface très restreinte, et permet ainsi une analyse plus poussée du phénomène de fragmentation. Cependant, comme vous allez le voir dans la suite, si l'étude de la structure des paysages sous-marins à grande échelle spatiale est possible depuis une vingtaine d'années, les données concernant la distribution des organismes marins sont peu nombreuses.

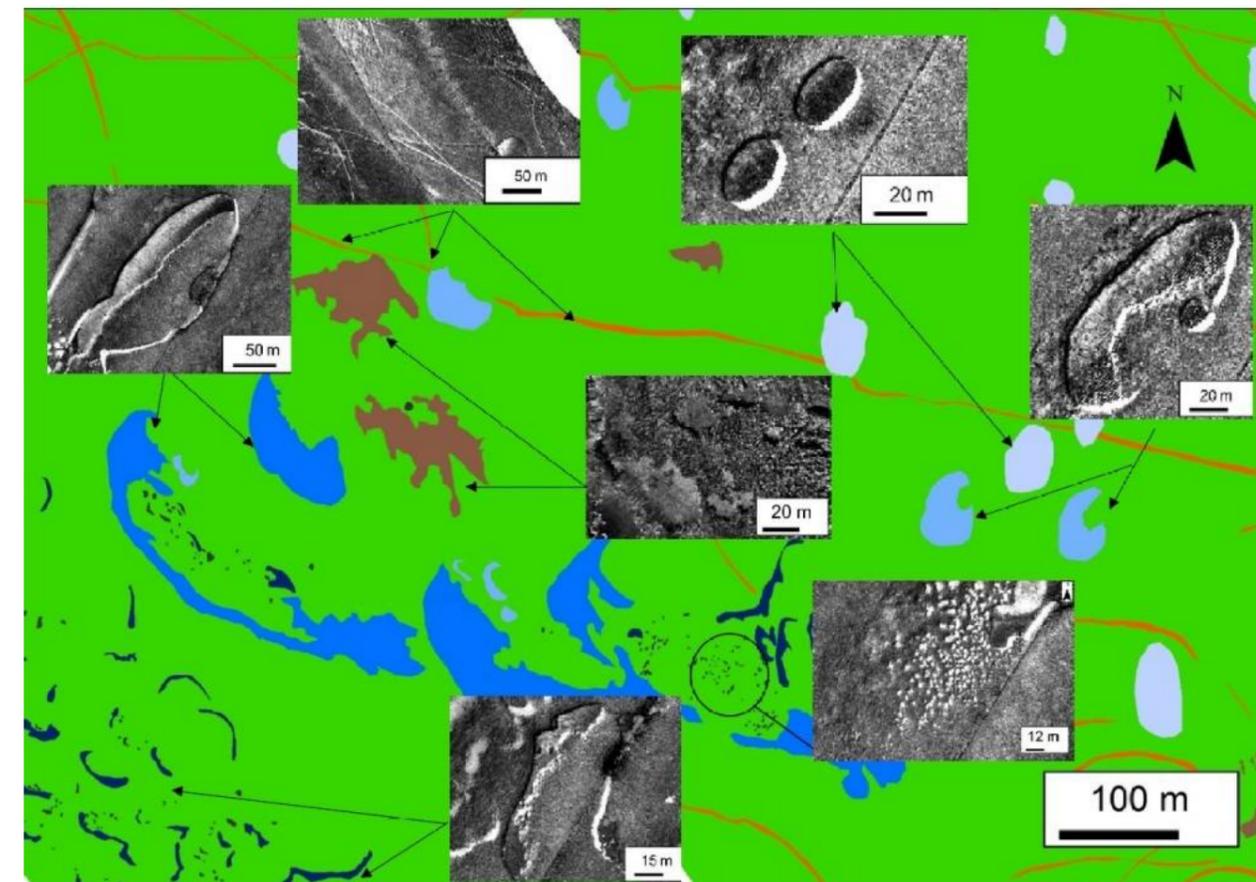
...avec une application difficile

La fonction des paysages sous-marins est très difficile à étudier. Cela est

Cartographie d'un herbier sous-marin (en vert) au large de la Corse et des différents types de taches sableuses qu'il contient avec l'image acoustique correspondante.



La première étude paysagère sous-marine s'intéresse aux étendues sableuses (intermattes) au sein des prairies de posidonies en Méditerranée française, ainsi qu'à la structure de ces derniers. Cette cartographie montre l'agencement des différents types d'herbiers à proximité du port de Bandol. Illustration tiré de Molinier et Picard (1952).





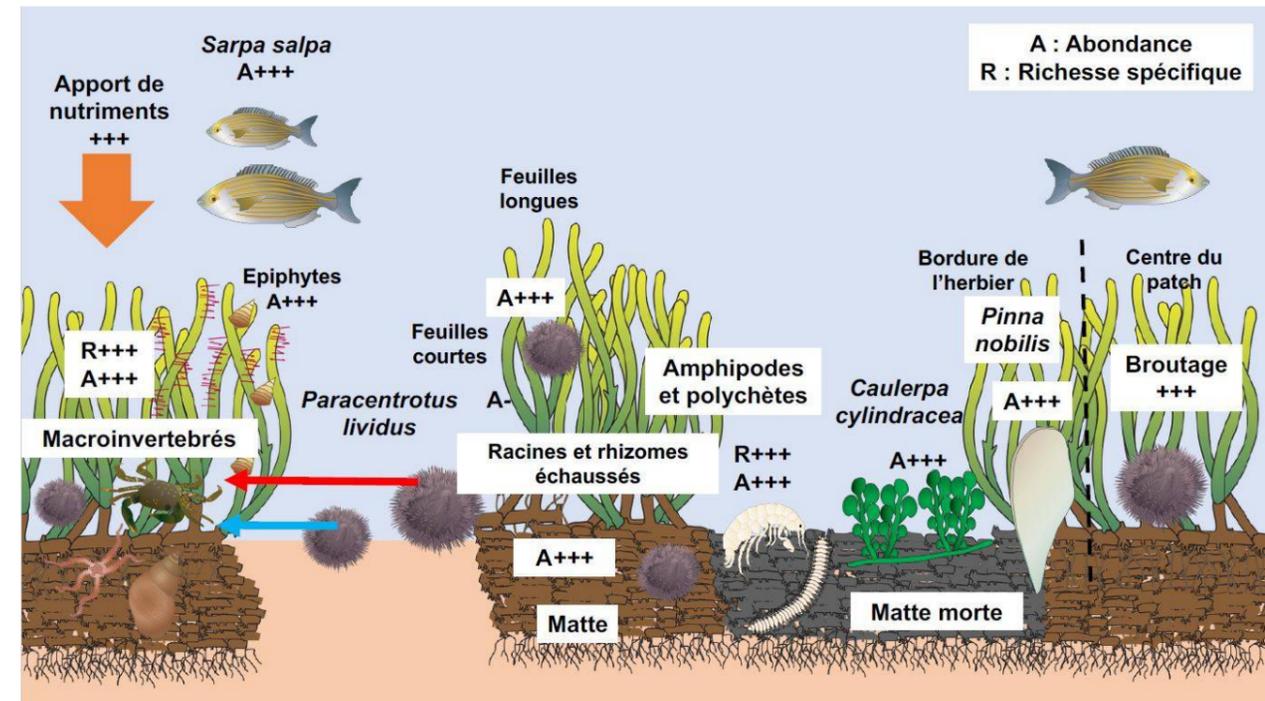
Comment se déplace cette raie pastenague (*Dasyatis chrysonata*) dans le paysage sous-marin d'Aliwal Shoal (Afrique du Sud) constitué d'alternance de roches et d'étendues sableuses ? Quelle est l'influence des bordures rocheuses sur ses mouvements et la prédation de ses proies ? Très difficile de réaliser des mesures pour répondre à ces questions de façon quantitative.

bien évidemment dû à l'accessibilité réduite du milieu marin, les incursions des scientifiques pour recueillir des observations sur la distribution de la faune et de la flore marine étant limitées dans le temps et dans l'espace. De plus l'écologie du paysage se base sur des données spatiales et quantitatives qui sont, au mieux, peu nombreuses pour la plupart des écosystèmes marins. En effet il est difficile de mesurer, par exemple, la réaction d'une espèce de poisson en fonction de la configuration du paysage sous-marin. Ou encore l'impact de la bordure entre un récif corallien et une étendue sableuse sur le mouvement des arthropodes (crabes, langoustes, etc.). Vous l'aurez compris le déplacement des espèces sous-marines mobiles est très difficile à étudier. Des technologies, telles que les balises GPS, existent pour les espèces les plus grosses qui remontent à proximité de la surface comme les baleines, les tortues, les requins et les manchots. En revanche cartographier les

déplacement à petite échelle d'un poisson de quelques centimètres de long est beaucoup plus complexe.

Les espèces immobiles ou fixées sont plus faciles à étudier et leur distribution est plus facile à cartographier. Il est notamment possible de reporter la position géographique de ces organismes, relevée en plongée, sur une carte des habitats réalisée avec des moyens acoustiques. Une autre méthode pour étudier la distribution des espèces en fonction de la structure du paysage sous-marin consiste à créer des configurations artificielles à l'aide de substrats synthétiques. Cette technique est particulièrement utilisées pour obtenir des informations sur la réponse des espèces marines à la configuration des prairies sous-marines. Il est très facile de reproduire des herbiers artificiels à faible coût en utilisant des lanières de plastiques.

Les mouvements de cette tortue verte (*Chelonia mydas*), observée dans les eaux martiniquaises, sont enregistrés grâce à la balise accrochée sur son dos. En superposant les positions de la balise à une carte des fonds marins il est possible de connaître l'influence du paysage sous-marin sur ses déplacements.



Synthèse des connaissances sur la distribution des organismes marins en fonction de la structure du paysage sous-marin formé par les prairies de posidonies. Traduit d'après Abadie et al. (2018).

Toutes ces difficultés d'acquisition de données quantitatives en milieu marin font que l'écologie paysagère est actuellement plus un sujet de recherche fondamentale que de sciences appliquées. Seules certains aspects de la structure du paysage sont cartographiés et analysés dans un but de gestion et de conservation de l'environnement marin, le plus souvent pour évaluer l'évolution des prairies sous-marines. Ce constat contraste avec ce qui se fait en milieu terrestre. L'écologie du paysage est notamment très utilisée dans les réserves naturelles afin de définir la taille et l'emplacement des zones protégées afin de permettre la bonne circulation des animaux mobiles tout en les protégeant. Si les aspects fonctionnels des écosystèmes et la distribution spatiale des

organismes marin étaient plus considérés lors de la mise en place de zones océaniques protégées, cela mènerait certainement à une conservation plus efficace de ces espaces marins, ainsi qu'un effet réserve***** plus important.

Une approche pluridisciplinaire plus qualitative

Ces quelques mots vous ont donné un aperçu des éléments qui constituent l'écologie paysagère et des paramètres étudiés de façon précise et quantitative. Vous avez également pu voir que ces mesures sont très difficiles à réaliser en milieu marin. Si l'étude de ces éléments

renseigne sur le fonctionnement des écosystèmes, en prenant notamment en compte l'influence des activités humaines sur l'environnement, ils ne considèrent pas la perception humaine des paysages qui varie d'une personne à l'autre. Cette perception disparate influe sur l'attrait et l'intérêt porté par l'être humain à un paysage, et par extension son usage et sa volonté de le préserver.

Sur terre il est clair qu'un berger, un citadin, un agriculteur et un touriste n'auront pas une perception identique d'un même paysage et de ses usages, comme par exemple une zone montagneuse. Il est important de noter que cela se vérifie même si les personnes n'ont jamais été sur place ou même n'ont jamais vu le paysage en question. En effet, dans notre monde moderne de

nombreux vecteurs d'information (littérature, reportages, réseaux sociaux, photographies, peintures, dessins) permettent de nous forger notre propre perception sur des lieux que nous ne visiterons probablement jamais. De cette perception naît une opinion sur les usages à faire de l'environnement et le niveau de protection à accorder à tel ou tel écosystème.

En ce qui concerne les paysages sous-marins le constat est similaire. Cependant, comme ce milieu est beaucoup moins accessible que l'environnement terrestre, l'imaginaire joue un rôle bien plus important. De plus, l'immense majorité des êtres humains n'a jamais contemplé de ses propres yeux de paysage sous-marin et n'en a, au mieux, qu'une connaissance sans expérience.



La perception d'un paysage, qu'il soit terrestre ou sous-marin, varie énormément d'une personne à l'autre. Difficile de prendre en compte l'ensemble de ces multiples facettes lorsqu'il s'agit de l'étudier.



Un plongeur muni d'une plaquette comportant les différents critères de notation du paysage sous-marin de Méditerranée dans le cadre du programme MedObs Sub.

Malgré ce fait, chaque personne a une perception des fonds marins souvent influencée par des notions esthétiques très personnelles. Comment prendre en compte la beauté et l'esthétique d'un paysage sous-marin ? Et surtout, est-ce qu'un paysage sous-marin (ou terrestre) perçu comme beau fournit une structure permettant un fonctionnement plus efficace des écosystèmes marins ?

Depuis une dizaine d'années, plusieurs travaux scientifiques visent à fusionner plusieurs disciplines (biologie, écologie, sociologie, histoire, économie, art) afin d'estimer la valeur écologique, patrimoniale et économique des paysages sous-marins. Des initiatives d'application de ce concept existe également au travers des programmes de sciences participatives impliquant les plongeurs loisir. Un bon exemple de ce type d'étude s'est déroulé en Méditerranée française de 2011 à 2016 : le MedObs Sub. Ce projet, à l'initiative de l'Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée – Corse, visait à obtenir des données qualitatives sur les paysages explorés lors des incursions sous-marines en notant leurs caractéristiques (relief, biodiversité, dégradations, etc.). L'ensemble de ces notes est compilé en un indice permettant un suivi de la qualité paysagère des sites de plongée. Ce type de sciences citoyennes est l'un des meilleurs moyens pour recueillir des données sur des aspects aussi abstraits que la beauté ou l'importance patrimoniale d'un paysage sous-marin.

Le mot de la Fin

L'écologie du paysage sous-marin est une science s'appuyant sur des données quantitatives difficiles à obtenir. De ce fait, son application dans un but de conservation et de gestion des espaces naturels marins reste encore marginal. Cependant, les techniques d'acquisition de données en milieu marin évoluent très

rapidement et permettront, dans un futur assez proche, d'opter pour une approche spatiale de l'étude de la structure de l'environnement et du mouvement des organismes marins. De plus, les derniers outils d'analyse informatique permettent une étude en trois dimensions des paysages.

En parallèle de l'acquisition de données, le concept même de paysage sous-marin évolue également. Ainsi l'étude des écosystèmes pélagiques, qui n'ont donc pas structure physique au sens classique du terme, transfère certaines métriques paysagères renseignant sur la distribution des organismes. Une autre évolution récente de la recherche scientifique est le concept de paysage de son (*soundscape* en anglais). Cette théorie utilisant l'acoustique sous-marine passive pour enregistrer les sons permet d'identifier l'origine des sons (navigation, travaux, poissons, crustacés, mammifères marins) et d'évaluer leur distance pour dresser des cartographies. Pas de doute, les recherches sur les paysages sous-marins n'en sont qu'à leurs débuts !

Glossaire

***Biogéographie** : croisement de différentes disciplines du vivant visant à comprendre la répartition des espèces sur la surface du globe en prenant en compte les caractéristiques géographiques à grande échelle.

****Biotope** : lieu de vie des organismes vivants définis par des caractéristiques physiques et chimiques particulières.

*****SIG** : système d'information géographique. Logiciel permettant de visualiser et d'analyser des données géoréférencées (disposant de coordonnées géographiques) afin de générer des cartes.

******Processus biogéochimique** : cycle

de transport et de transformation d'éléments ou de composés chimiques entre les grands réservoirs (géosphère, hydrosphère, atmosphère) et la biosphère.

******Intermatte** : patch de sable ou de matte morte au sein d'une prairie de posidonies.

*******Effet réserve** : lorsque les populations d'espèces d'intérêt pour la pêche deviennent trop importantes dans une zone protégée, les juvéniles sortent des limites de l'espace protégés et peuvent être capturés par les pêcheurs.

Pour en savoir (beaucoup) plus

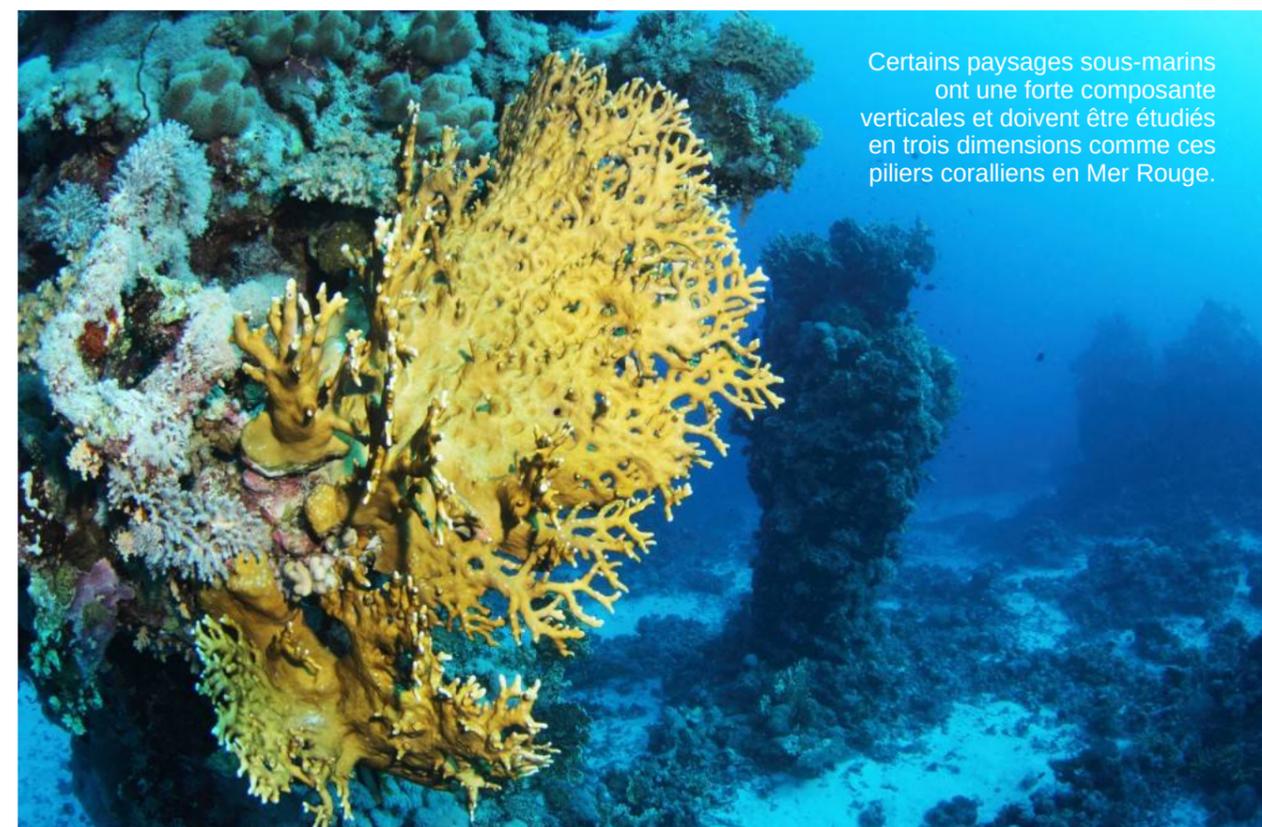
Abadie A., Pace M., Gobert S., Borg J. A. (2018). Seascape ecology in *Posidonia oceanica* seagrass meadows: Linking

structure and ecological processes for management. *Ecological Indicators* 87: 1-13

Boström C., Pittman S.J., Simenstad C., Kneib R.T. (2011) Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Marine Ecology Progress Series* 427: 191-217 (pdf)

Musard O., Fournier J., Marchand J. (2007) Le proche espace sous-marin : essai sur la notion de paysage. *L'Espace géographique*, tome 36(2), 168-185 : <https://www.cairn.info/revue-espace-geographique-2007-2-page-168.htm?contenu=article>

Petit-Berghem Y., Deheul T. (2018) Le paysage sous-marin existe-t-il ? De la connaissance à la reconnaissance d'un concept émergent. *Géoconfluences* : <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-thematiques/changement-global/articles-scientifiques/paysage-sous-marin>

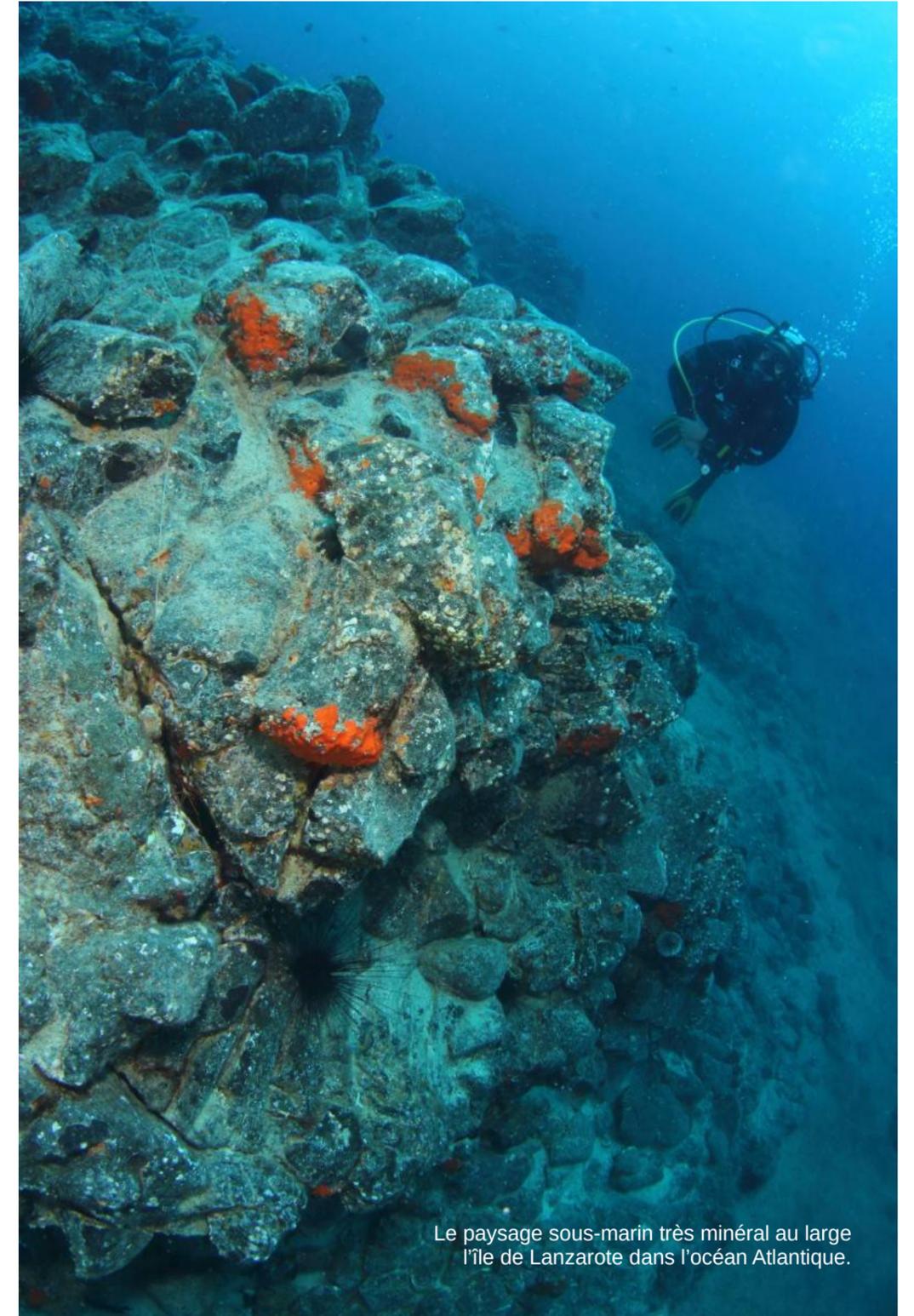
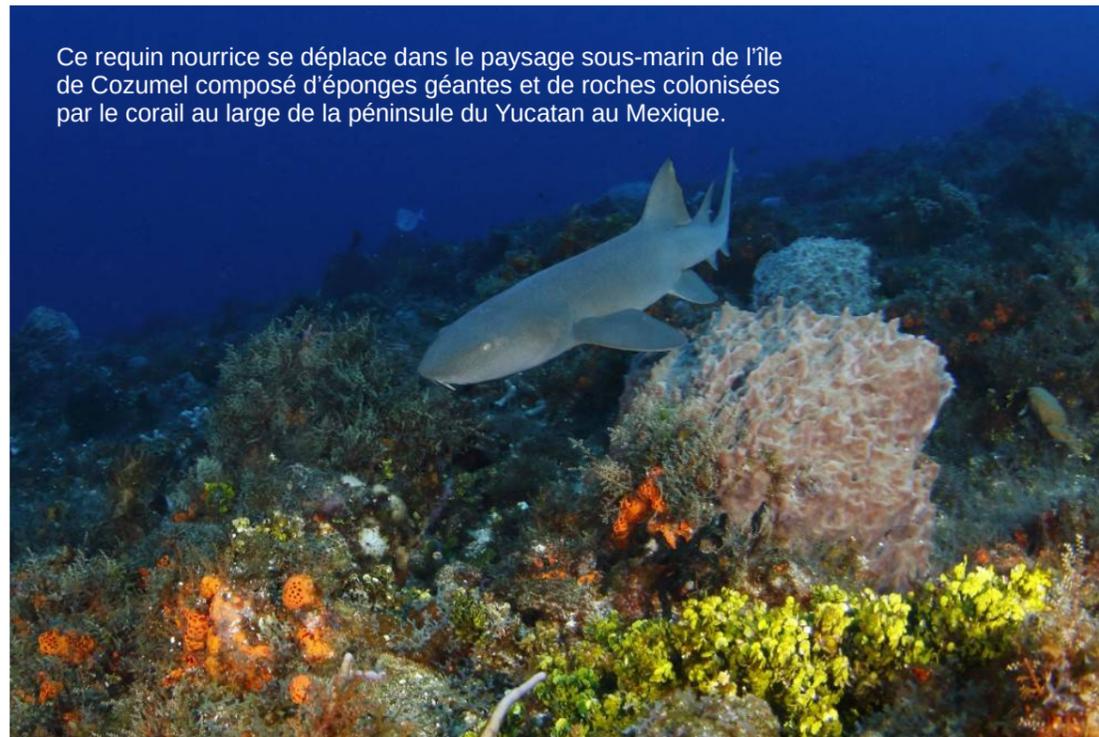


Certains paysages sous-marins ont une forte composante verticale et doivent être étudiés en trois dimensions comme ces piliers coralliens en Mer Rouge.

Les longues feuilles des herbiers de posidonies en Méditerranée cachent un paysage sous-marin à la structuration très complexe avec une alternance de trous de sédiment.



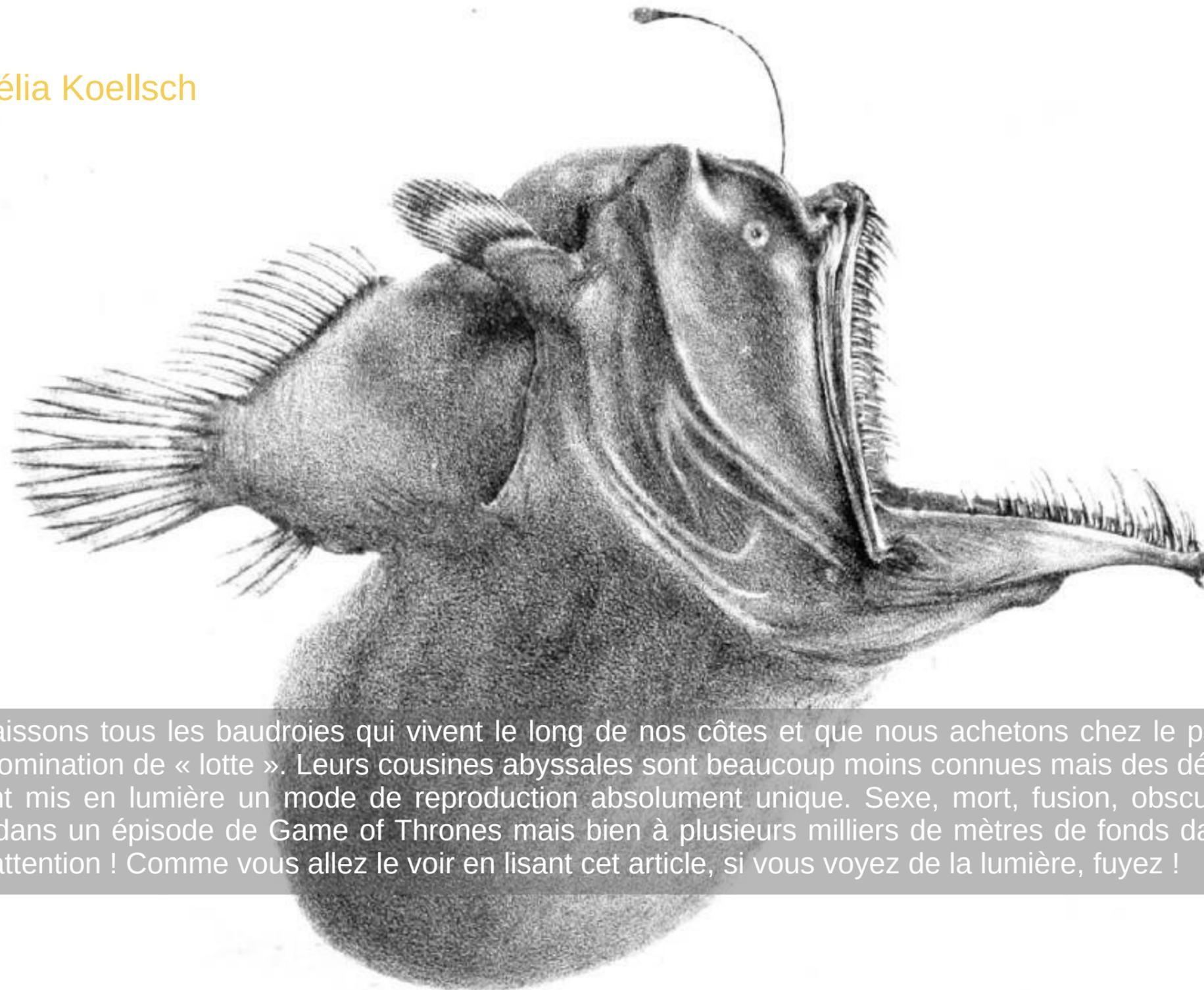
Ce requin nourrice se déplace dans le paysage sous-marin de l'île de Cozumel composé d'éponges géantes et de roches colonisées par le corail au large de la péninsule du Yucatan au Mexique.



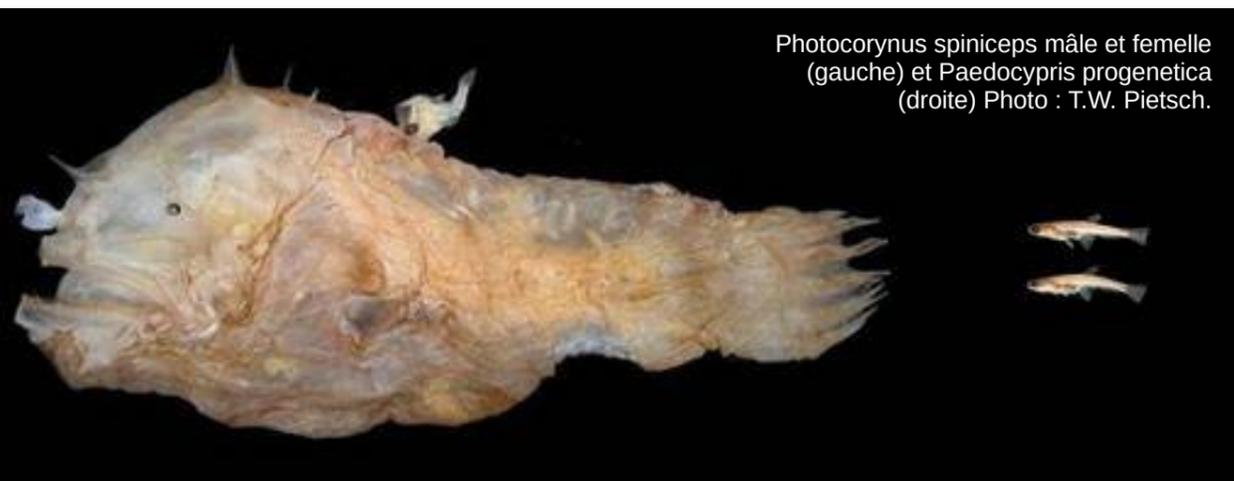
Le paysage sous-marin très minéral au large l'île de Lanzarote dans l'océan Atlantique.

NE FAIRE QU'UN CHEZ LES BAUDROIES ABYSSALES

Texte : Célia Koellsch



Nous connaissons tous les baudroies qui vivent le long de nos côtes et que nous achetons chez le poissonnier sous la dénomination de « lotte ». Leurs cousines abyssales sont beaucoup moins connues mais des découvertes récentes ont mis en lumière un mode de reproduction absolument unique. Sexe, mort, fusion, obscurité. Vous n'êtes pas dans un épisode de Game of Thrones mais bien à plusieurs milliers de mètres de fonds dans le noir total. Mais attention ! Comme vous allez le voir en lisant cet article, si vous voyez de la lumière, fuyez !



Photocorynus spiniceps mâle et femelle (gauche) et Paedocypris progenetica (droite) Photo : T.W. Pietsch.

L'histoire sans fond

Les abysses, du terme « ábyssos » en grec signifient « sans fond ». En effet on considère les abysses comme le fond des océans couvrant ainsi plus de 300 millions de km². Au-delà de 1000 mètres de profondeur, la lumière de la surface n'est plus présente, c'est pour-quoi quand nous évoquons les abysses la première chose qui nous vient en tête est l'obscurité profonde qui y règne. Ces zones profondes des océans n'ont d'ailleurs été découvertes par l'Homme que récemment. C'est entre 1950 et 1952, lorsque des Danois partent faire le tour du monde, qu'ils rapportent de leur voyage plus de 115 espèces prélevées à plus de 6000 mètres de profondeur ! La vie semble donc être présente à plusieurs milliers de mètres de profondeur, contredisant le naturaliste anglais Forbes, qui pensait que la vie n'était plus possible au-delà de 550 mètres. Cependant entre 1872 et 1876, Charles Wyville Thomson organise un voyage de quatre années autour du monde, parcourant les océans à la recherche d'animaux peuplant le fond des mers. Il parvient à remonter des espèces vivants jusqu'à 5500 mètres de profondeur. C'est à cette époque la plus grande profondeur jamais atteinte, Wyville Thomson talonne donc de près les 6000 mètres des Danois presque un siècle plus

tard. L'exploration des abysses n'est cependant possible que depuis une quarantaine d'années grâce aux sous-marins bathyscaphes, capables d'atteindre des profondeurs de près de 11 000 mètres (fosse des Mariannes – 10 994 mètres).

La vie prolifère dans les abysses

Les plaines abyssales composent la majeure partie des océans et se trouvent entre 3000 et 6000 mètres de profondeur. Ce milieu ne présente à première vue aucune condition propice à la vie ; pas de lumière, pas de photosynthèse envisageable, des températures comprises entre 0,5 et 2°C, une pression écrasante (jusqu'à 1000 bars à 10 000 mètres) et peu d'oxygène, d'azote etc... Et pourtant il y a bien des organismes qui vivent dans ces profondeurs obscures. Ils représentent environ 10% des espèces marines avec 10 millions d'espèces différentes parmi les microorganismes, telles que les bactéries extrêmophiles comme Thermococcus barotoleran et animaux tels que la Galatée yéti (Kiwa Hirsuta). Les sources de matières organiques nécessaires à la vie proviennent en partie de la surface, avec la décomposition des cadavres sur



Le sous-marin Nautil de l'IFREMER, fleuron français de l'exploration des profondeurs abyssales. Photo CC Sitron.

des niveaux plus haut, les restes de nourriture qui tombe depuis la zone épipélagique* et des déjections. La seconde source de matières organiques la plus importante est fournie par les sources hydrothermales dans les fonds océaniques qui apportent de l'eau de mer réchauffée et enrichie en métaux divers, en gaz dissous et autres composés chimiques comme du fer, de l'hydrogène, du méthane etc... Autour de chaque source hydrothermale se développe un écosystème riche et unique où l'on trouve des espèces inobservables dans les étages supérieurs.

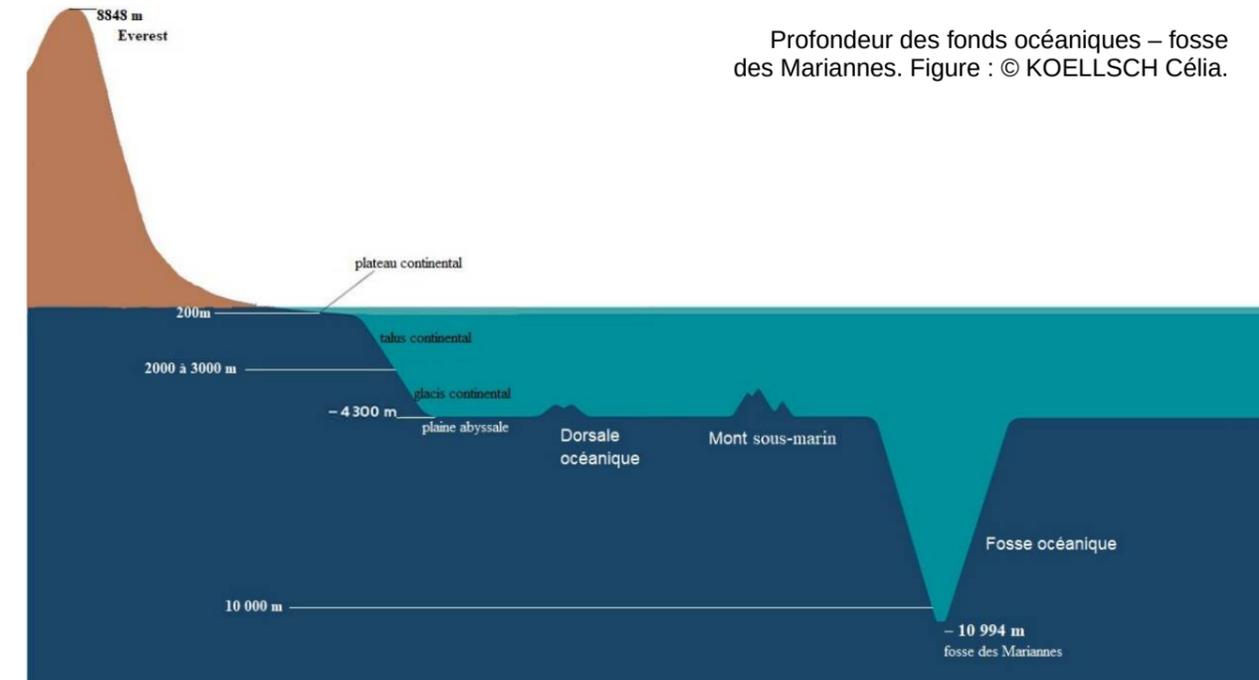
Ne pouvant réaliser la photosynthèse, la plupart des organismes se trouvant dans ce milieu ont un métabolisme basé sur la chimiosynthèse, la synthèse de substances organiques grâce à l'énergie chimique dégagée par les fluides hydrothermaux notamment grâce aux bactéries symbiotiques bioluminescentes. Les animaux que l'on

trouve dans ce milieu sont d'allures plutôt terrifiantes, équipés de bouches importantes, d'yeux disproportionnés et souvent globuleux pour capter le peu de lumière disponible, d'antennes et de dents démesurément longues. La faune abyssale est répartie en deux catégories distinctes : le benthos, qui est composé de l'ensemble des organismes vivants à proximité du fond de l'océan et le pelagos, qui comprend les espèces qui occupent une « colonne d'eau ».

Ces deux catégories d'organismes vivants se retrouvent dans les différents étages océaniques : la zone mésale ou zone crépusculaire, est comprise entre 200 et 1000 mètres de profondeur et ne laisse passer qu'une faible luminosité en provenance de la surface. La zone bathyale, comprise entre 1000 et 4000 mètres, représente le plus grand des étages océaniques et ne laisse passer aucune lumière en dehors d'une faible lumière bleue nécessaire à la

La baudroie abyssale

Profondeur des fonds océaniques – fosse des Mariannes. Figure : © KOELLSCH Célia.



bioluminescence des animaux et microorganismes. La zone abyssale, comprise entre 4000 et 6000 mètres où plus aucune lumière n'est présente. La zone hadale qui débute à partir de 6000 mètres, est la zone la moins connue, celle où il y a encore sûrement le plus d'espèces à découvrir dans les fonds océaniques.

La faune abyssale regroupe de nombreuses espèces marines visibles dans des étages plus hauts. Cependant celles qui se trouvent dans les abysses ont su s'adapter au mode de vie des fonds océaniques pour y vivre et s'y développer notamment en adoptant des structures physiologiques et comportementales particulières. Parmi ces adaptations on retrouve des comportements trophiques ambivalents (nécrophages, détritivores) qui relèvent d'un opportunisme alimentaire, une bioluminescence qui sert souvent d'appât, une croissance ralentie, une densité musculaire réduite pour limiter la dépense d'énergie, une vessie natatoire (le plus souvent atrophiée pour supporter les

changements de pression), une maturité sexuelle tardive et des bactéries symbiotiques. Il est important de noter que la symbiose est sans doute l'adaptation la plus importante pour survivre dans ce milieu extrême.

La baudroie abyssale, un poisson aux allures étranges

Bon nombre d'entre vous a déjà entendu parlé de la baudroie abyssale, ce poisson si particulier qui vit dans les abysses - d'où son nom - et qui est équipé d'une sorte de tige sur le front qui lui sert de leurre pour attraper ses proies. Ce poisson a notamment été popularisé par le film Némó de Disney en 2003. Environ 200 espèces ont été identifiées à ce jour dont cinq dans les abysses.

La baudroie abyssale vit en général à des profondeurs allant de 500 à 2000 mètres dans les océans Pacifique, Indien et Atlantique et n'est que rarement observée par les scientifiques. La femelle, qui semble sortie d'un film d'horreur,

Double spine seadevils (Diceratias pileatus).
Photo : Doug Perrine/VCG Photo.



© 视觉中国

présente des nageoires courtes, des yeux minuscules couverts d'un voile fin et une mâchoire imposante avec de grandes dents qui peuvent se replier vers l'arrière et ne lui servent qu'à saisir ses proies et non à les mâcher, préférant les gober. La tige sur son front est bioluminescente grâce à l'action de bactéries symbiotiques** et permet d'attirer ses proies - car rappelons le, dans les abysses il y a peu voire aucune lumière disponible - ainsi que ses partenaires sexuels.

Seuls des spécimens femelles avaient été décrits

Jusqu'à récemment les scientifiques s'étonnaient de ne trouver que des individus femelles, jamais aucun spécimen mâle...étrange. C'est une vidéo tournée par Kirsten et Joachim

Jakobsen avec leur submersible LULA1000 en Août 2016 à proximité de l'île de São Jorge au Portugal et diffusée en 2018 qui alerte les scientifiques. Sur cette vidéo on aperçoit notamment un mâle Caulophryne jordani accroché au ventre de sa femelle. Cette dernière est équipée de longs filaments qui partent du corps et qui semblent eux aussi bioluminescents. Ils servent certainement à détecter et à repérer les éventuelles proies dans l'espace, ce qui pourrait mener encore à une autre découverte. Au retour de leur expédition, les deux explorateurs ont envoyé leur vidéo à Ted Pietsch, professeur émérite des sciences aquatiques et halieutiques de l'Université de Washington à Seattle.

« Pour comprendre la biologie et l'écologie d'une espèce, rien ne remplace des observations en milieu naturel », explique Ted Pietsch. Et en effet, ces



La baudroie abyssale la plus célèbre du monde ! Apparue dans le film d'animation de Disney Finding Nemo. Photo : © Disney.

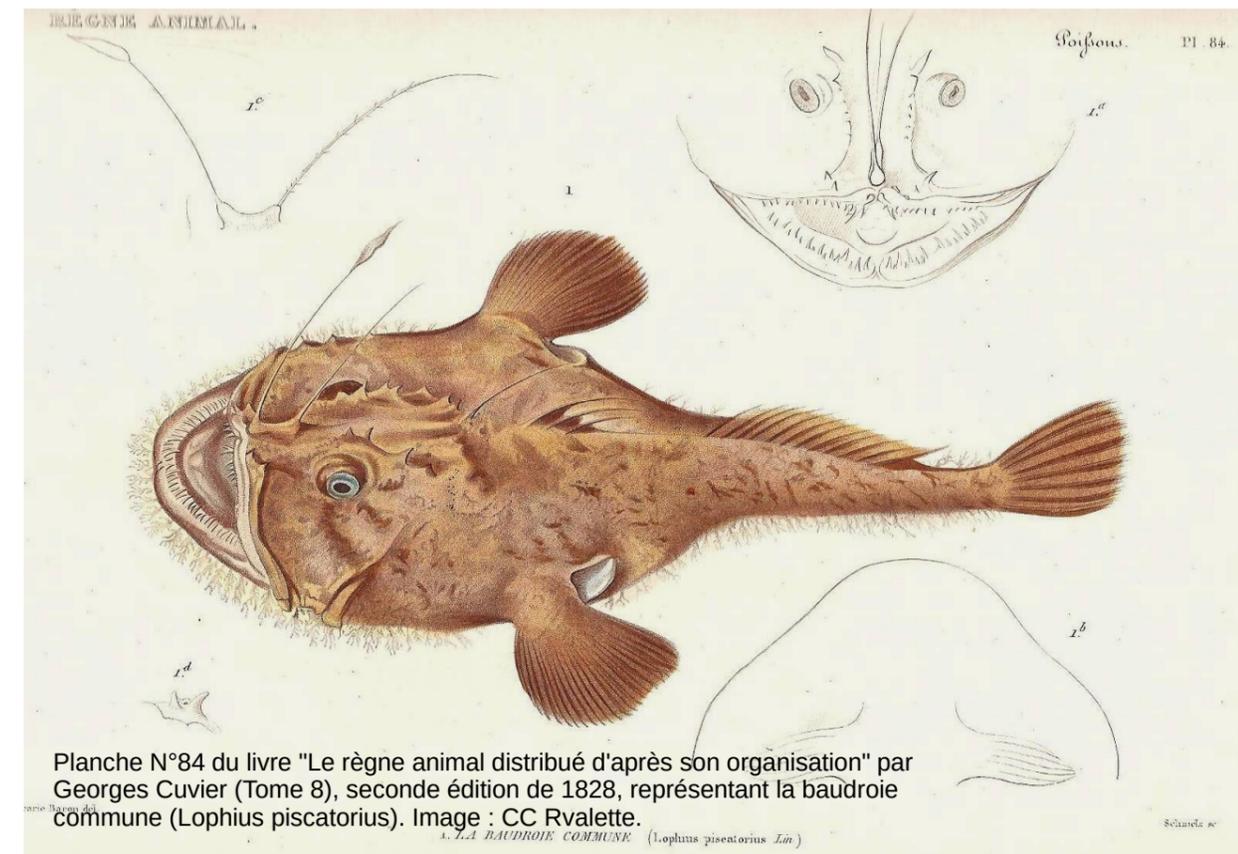


Planche N°84 du livre "Le règne animal distribué d'après son organisation" par Georges Cuvier (Tome 8), seconde édition de 1828, représentant la baudroie commune (Lophius piscatorius). Image : CC Rvalette.

images ont révélé des structures et des comportements jamais observés auparavant. Ici les structures filamenteuses et lumineuses se dégagent des nageoires indépendamment « Pour former une sorte de réseau d'antennes sensorielles semblables aux moustaches de chats » continue le scientifique américain.

Chez certaines espèces lophiiformes*** les individus peuvent présenter des dimorphismes sexuels assez impressionnant (comme chez certaines espèces d'araignées). C'est le cas ici, le mâle ne mesurant en réalité pas plus de 3cm contre les 20cm et plus de la femelle en question. A l'inverse de sa congénère il ne présente ni mâchoire imposante, ni lanterne, ni corps imposant et ses yeux sont plus développés.

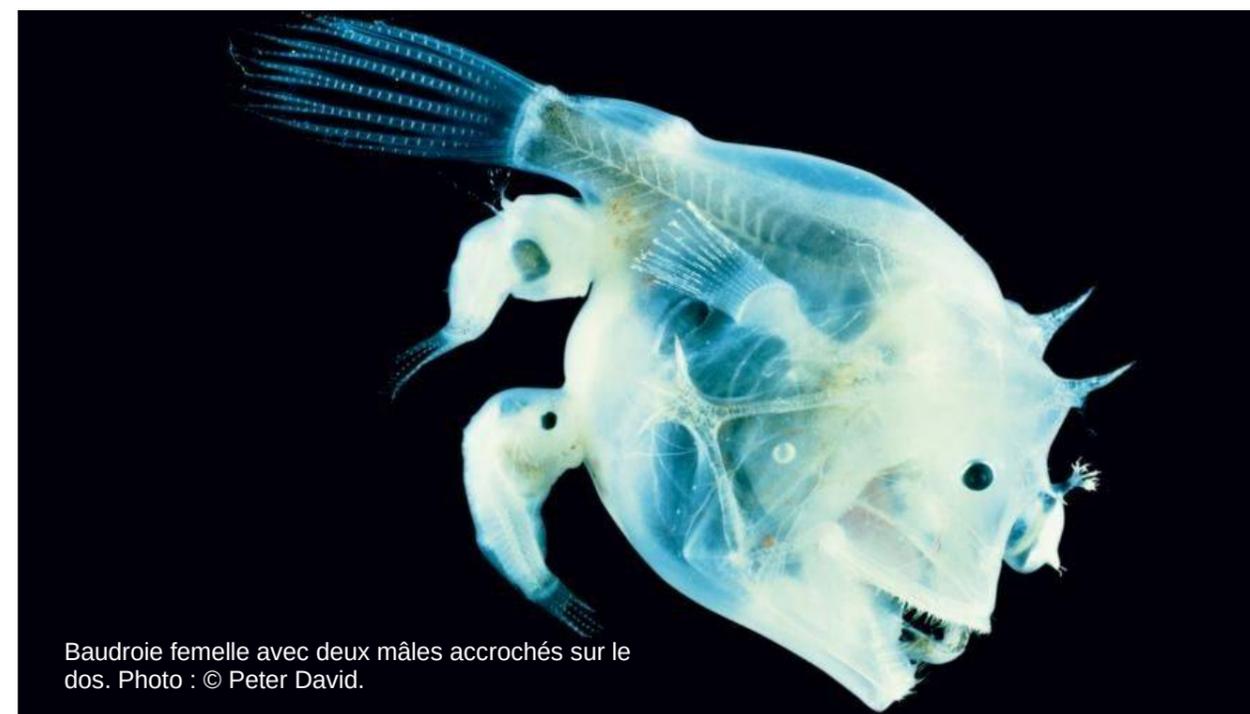
Mais ce qui vient après est encore plus impressionnant. Au-delà de l'apparence singulière du mâle se trouve également un mode de reproduction tout aussi particulier. Le mâle ne possède pas de lanterne pour attirer ses proies. A la

place il est équipé de grands yeux pour repérer la petite lanterne sur le front de sa future compagne. Il dispose également de fosses nasales très développées, lui permettant de détecter les signaux chimiques envoyés par les femelles. Ainsi en plein cœur des abysses et malgré sa petite taille, le petit mâle parvient à trouver son chemin jusqu'à sa promise.

C'est l'amour fusionnel

Lorsque le mâle parvient à trouver la femelle il la mord pour pouvoir y rester accroché. Mais cela ne s'arrête pas là et l'histoire d'amour la plus atypique n'en est qu'à son début. En effet, une fois que le mâle est bien accroché à sa dulcinée il va alors libérer une enzyme qui va lui permettre de fusionner avec les tissus et le système circulatoire de la femelle, faisant circuler le sang de sa partenaire dans son corps et ainsi se nourrir des nutriments qu'elle absorbe via le sang, à la manière d'un fœtus.

Le mâle, à présent dépendant de la



Baudroie femelle avec deux mâles accrochés sur le dos. Photo : © Peter David.

femelle, agit donc comme un parasite et va s'atrophier et fusionner d'avantage avec le corps de sa partenaire. Il va ainsi perdre les organes et les parties de son corps qui ne lui serviront plus, comme ses yeux (l'amour rend aveugle), ses nageoires, son cerveau et la plupart de ses organes internes au fil du temps jusqu'à n'être réduit qu'à l'état de simple gonade****. A l'issue du processus il ne constitue plus qu'une sorte d'excroissance sur le corps de la femelle.

"Le mâle devient un "parasite sexuel", dépendant pour le restant de ses jours et incapable de se libérer, fertilisant les œufs produits par la femelle", indique Theodore Pietsch. Les deux individus finissent donc par n'en donner qu'un seul, devenant un organisme unique et fonctionnel. Le mâle étant réduit à une simple banque de sperme, servira par la suite uniquement à la fécondation des œufs et seulement quand la femelle décidera qu'elle en a besoin. La femelle peut alors présenter plusieurs partenaires sexuels sur son corps, jusqu'à huit mâles ayant été observés chez certaines

espèces, se parant de ses congénères comme des ornements.

« J'ai étudié ces animaux pendant la plus grande partie de ma vie et je n'ai jamais rien vu de tel [...]C'était vraiment un choc pour moi », explique Ted Pietsch. D'après lui, c'est seulement la troisième fois que le comportement des baudroies des abysses est filmé et la première fois qu'un accouplement est observé avec des individus vivants. Cet événement reste extrêmement rare à observer.

Le mot de la Fin

Ici les baudroies abyssales ont donc un mode de reproduction plus associé à du parasitisme qu'à une symbiose à première vue, mais qui devient par la suite un comportement complexe et inédit. A la lecture de cet article, vous avez pu constater que nous sommes encore loin de tout savoir de la faune et de la flore qui nous entoure et que l'océan nous réserve souvent des découvertes impressionnantes. A ce jour beaucoup d'espèces des abysses et leurs modes de



Baudroie abyssale mâle. Photo : © David Shale.

Haplophryne mollis avec deux mâles.
Photo : ©David Paul / VCG Photo.



© 视觉中国

vie nous sont encore inconnus et révèlent l'importance de protéger et conserver ce milieu ainsi que de poursuivre nos recherches dans le domaine afin d'avoir les compétences nécessaires à la conservation de cet écosystème si particulier.

Pour en savoir (beaucoup) plus

Pietsch T.W (2009) Oceanic Anglerfishes, Extraordinary Diversity in the Deep Sea

Pietsch T.W (2005) Dimorphism, parasitism, and sex revisited: modes of reproduction among deep-sea ceratioid anglerfishes (Teleostei: Lophiiformes)

Bertelsen E. (1978) Notes on linophrynids IV: a new species of deepsea anglerfish of the genus Linophryne and the first record of a parasitic male in Linophryne corymbifera (Pisces, Ceratioidei) Steenstrupia

Jespersen A. (1984) Spermatozoans from a parasitic dwarf male of Neoceratias spinifer Pappenheim, 1914 Vidensk Medd Dan Nathist Foren

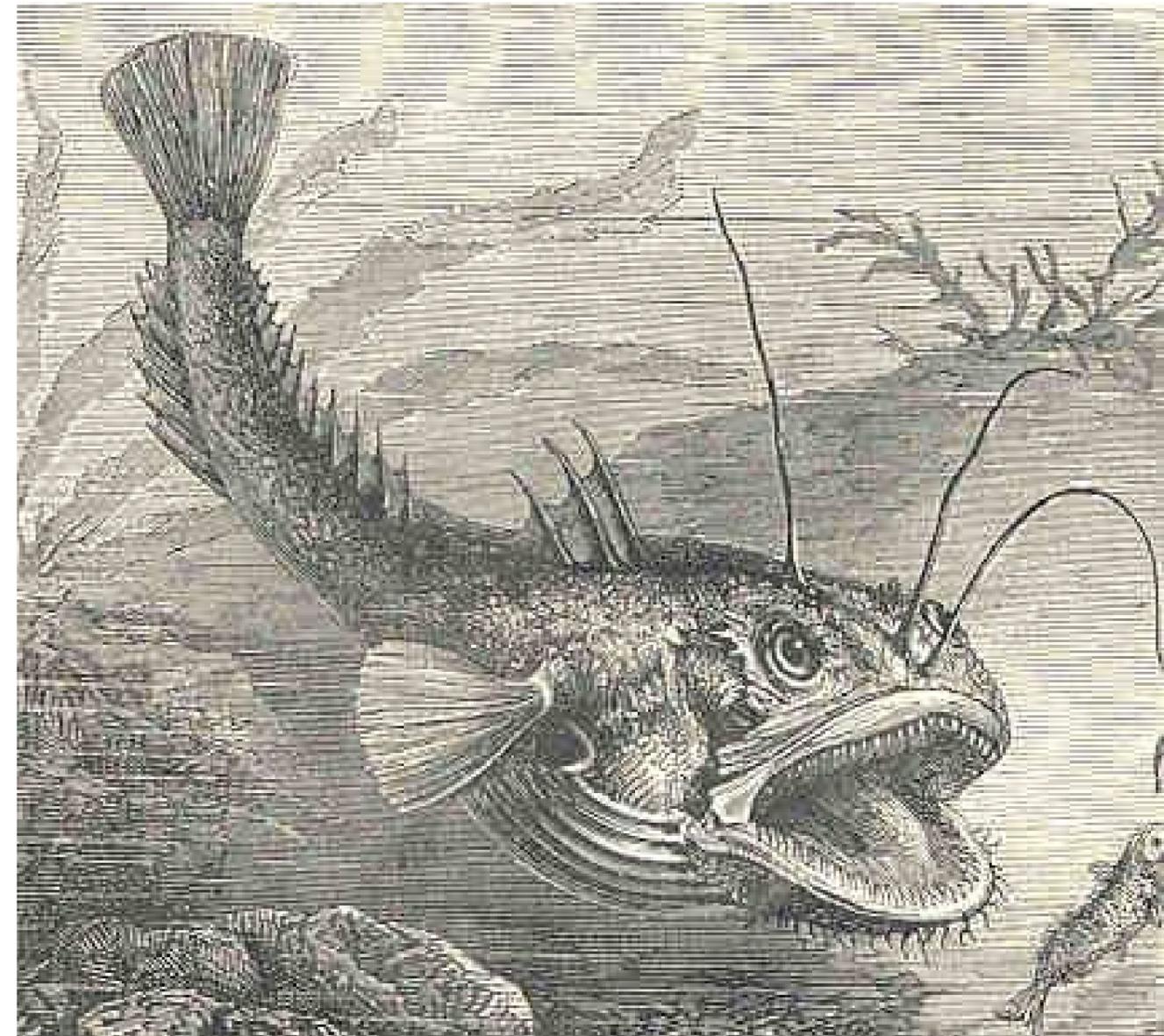
Glossaire

*Zone épipélagique : Aussi appelée zone photique, c' est une zone comprise entre la surface et les abysses, là où la lumière parvient dans l'eau et où vit la majorité des animaux marins

**Bactéries symbiotiques : Ce sont des bactéries qui interagissent de façon mutualiste avec un autre organisme, c'est une forme de symbiose.

***Espèces lophiiformes : autrement dit les poissons-pêcheurs, constituent un ordre de poissons qui regroupe les baudroies.

****Gonade : Organe reproducteur qui génère des gamètes. Chez le mâle cela correspond aux testicules.



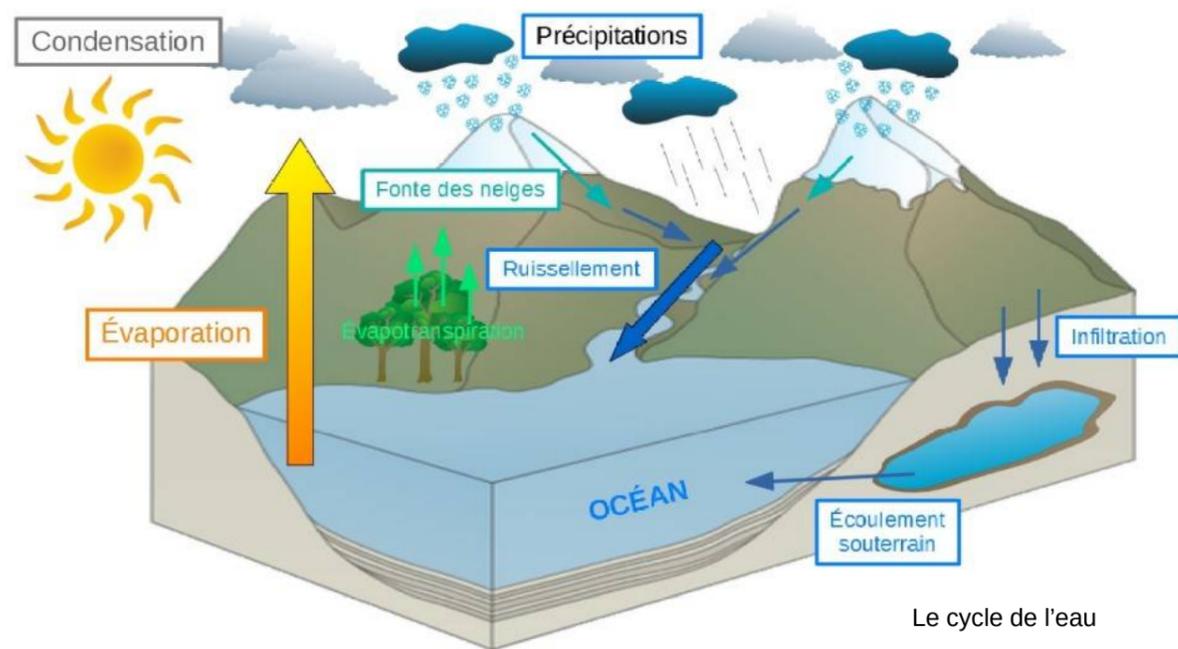
Retour à des profondeurs plus rassurantes avec la baudroie commune (Lophius piscatorius). Gravure de Edmond Perrier (1886).



LE CYCLE DE L'EAU EN CORSE

Le cycle de l'eau est connu de tous. Son fonctionnement est un enseignement classique de l'école primaire et un phénomène que nous pouvons observer quasiment au quotidien. C'est le principal processus d'échange entre l'océan et le milieu terrestre. Les réserves d'eaux douces mondiales sont fortement liées à ces échanges tout comme un nombre important de nos activités comme l'agriculture ou la production d'énergie électrique. Quel meilleur exemple qu'une île au relief très marqué comme la Corse pour comprendre et illustrer ce processus ? Vous allez voir que le cycle de l'eau réserve encore de belles découvertes bien qu'il soit étudié depuis toujours et qu'il est un rouage essentiel des changements globaux initiés par le réchauffement climatique.

Texte et photos : Arnaud Abadie

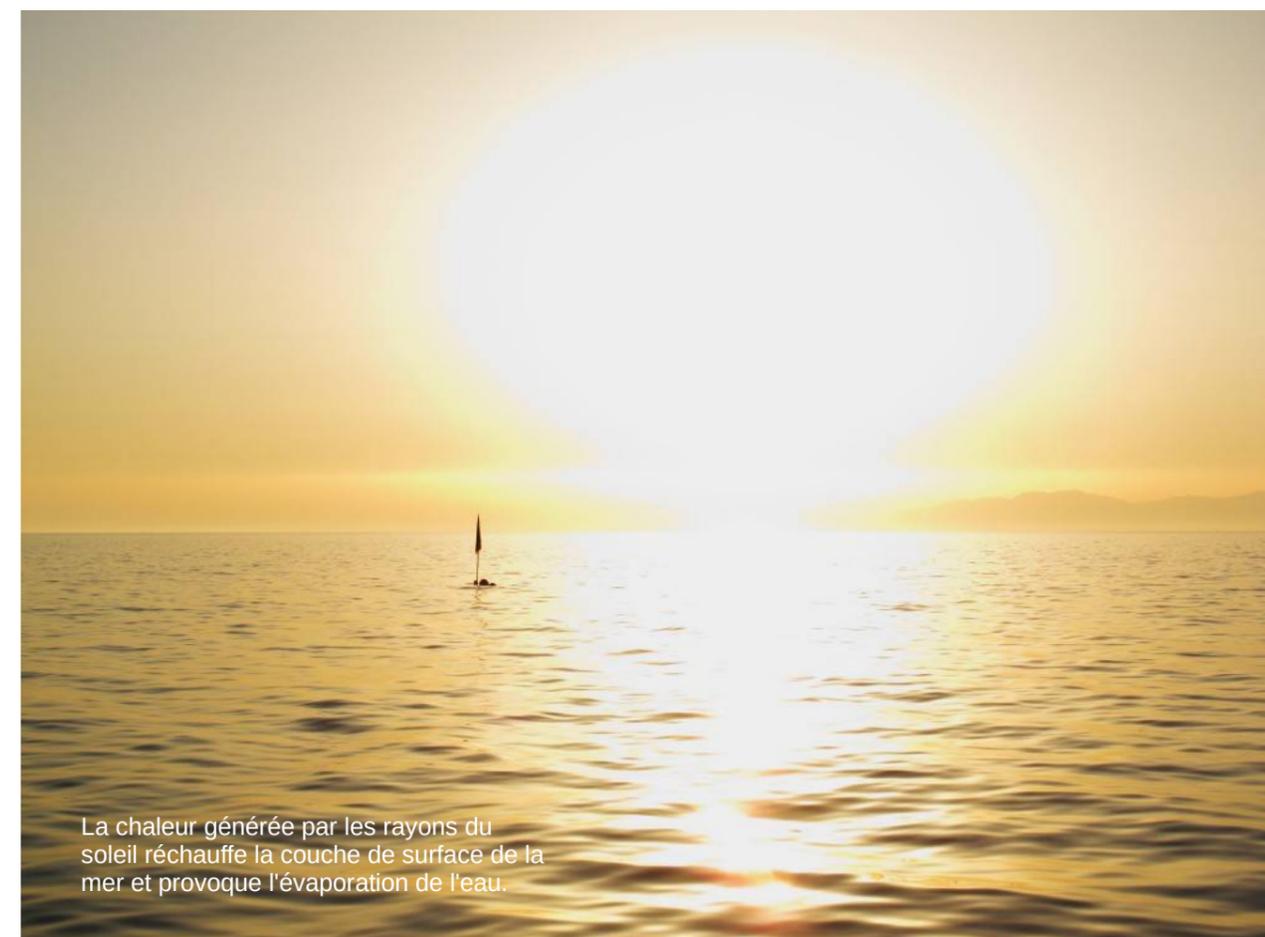


Évapotranspiration

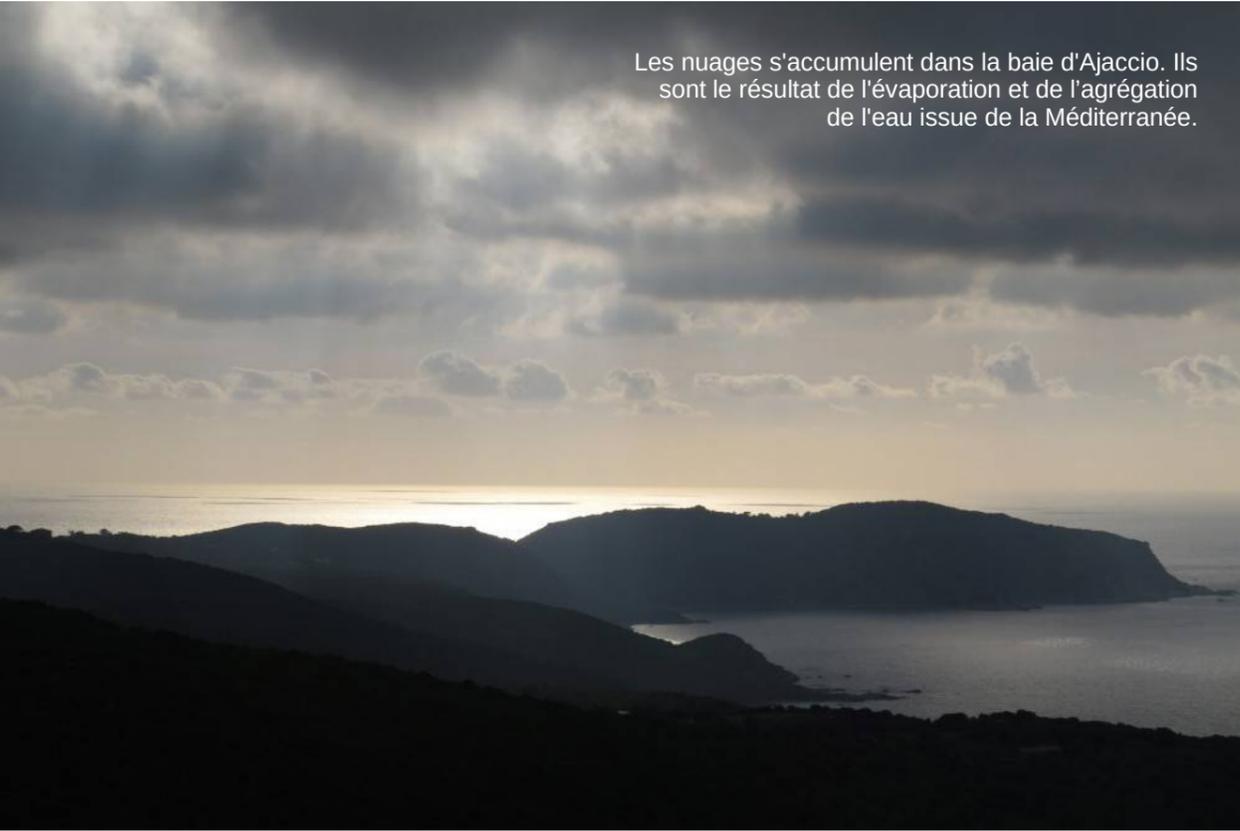
Nous connaissons tous les différentes étapes du cycle de l'eau. Sur les îles ayant un fort relief montagneux comme la Corse il est possible d'observer l'entièreté de ce cycle depuis un unique point d'observation lorsque l'on se trouve sur le littoral. Commençons donc à parcourir les différentes étapes en commençant par l'océan, ou plutôt la mer Méditerranée. Le cycle de l'eau peut être assimilé à une immense machine à vapeur à l'échelle de notre planète. L'eau de surface de la mer s'évapore sous l'action de la chaleur générée par le soleil. L'évaporation de l'océan est d'ailleurs l'un des phénomènes faisant varier sa salinité. Dans le cas de la mer Méditerranée, ce processus est accentué du fait de sa petite taille, de sa configuration quasiment fermée et des températures élevées durant les périodes chaudes de l'année. L'ensemble de l'eau présente sur la surface terrestre est également sujette à évaporation mais constitue un réservoir bien plus faible que les océans.

La mer n'est pas la seule source d'eau dans l'atmosphère. La végétation joue également ce rôle via le phénomène appelé l'évapotranspiration. En effet, les végétaux produisent de l'eau par transpiration (comme nous lorsque nous avons trop chaud) qui s'évapore également sous l'effet de la chaleur dégagée par l'énergie solaire. Globalement la transpiration des plantes compte pour environ 60 % de l'apport d'eau dans l'atmosphère. Cette proportion est encore plus importante dans les zones tropicales. Le changement climatique, l'urbanisation et la déforestation affectent bien évidemment ce processus et ainsi le cycle entier. La température moyenne annuelle de l'air en Corse a augmenté d'environ 1°C depuis 1970 sur le littoral et de 2°C aux altitudes supérieures à 500 m. Cela conduit à une évapotranspiration plus élevée sur le littoral de l'île, passant ainsi de 1 000 à 1 100 mm par an.

La suite du cycle se passe dans l'atmosphère. L'eau qui s'est évaporée de la surface de la mer, de la terre et de la végétation se condense et s'agrège en



Les nuages s'accumulent dans la baie d'Ajaccio. Ils sont le résultat de l'évaporation et de l'agrégation de l'eau issue de la Méditerranée.



Un brouillard épais et humide se répand dans la forêt de Bonifato au nord-ouest de la Corse. Ce phénomène est suivi par des précipitations pluvieuses brèves mais intenses.

nuages. Le teneur en eau influe sur la pression de l'air dans la basse atmosphère. Ainsi, plus la quantité d'eau est importante, plus la pression d'air diminue. Ce phénomène influe notamment sur la circulation atmosphérique, autrement dit sur la force des vents. En augmentant la quantité d'eau qui s'évapore, la hausse globale de la température de l'air augmente ainsi la teneur en eau dans l'atmosphère et donc influe sur les régimes de vents.

De l'eau ou de la neige

Au sein des nuages a lieu la coalescence, c'est à dire l'amalgamation de gouttelettes d'eau pour en former de plus grosses. Pour que les gouttes ainsi formées précipitent vers la surface, il faut que l'air arrive à saturation en eau. Deux mécanismes du transport d'eau depuis la surface vers l'atmosphère peuvent conduire à la saturation de l'air, et ainsi à deux sortes de précipitations. Les premières sont les précipitations dites stratiformes qui consistent une condensation uniforme à grande échelle, comme par exemple les précipitations côtières. Le second type de précipitations, dites connectives, correspond à une

instabilité atmosphérique créant une brusque élévation d'une masse d'air chargée en humidité. La nature des précipitations - pluie, neige ou toute autre forme intermédiaire - dépend des températures rencontrées par les gouttes ou les cristaux de glace entre leur altitude de formation et la surface. Si ces températures sont inférieures ou égales à 0°C, c'est alors de la neige qui tombe. Si les températures sont plus élevées ce sera de la pluie.

Lorsque les précipitations neigeuses atteignent le sol, elles s'accumulent pour former un manteau neigeux. En France la quantité de précipitations neigeuses est mesurée en centimètres. Si la température au sol est négative, la neige reste en place. La température de l'air diminue lorsque l'altitude augmente. Ce phénomène est appelé gradient thermique adiabatique*. La haute altitude du massif montagneux corse - le plus haut sommet, le Monte Cinto, culmine à 2 706 mètres - dispose de températures négatives durant l'hiver et le printemps, et assure ainsi le maintien pendant plusieurs mois d'une couche neigeuse. Les précipitations neigeuses sont cependant fluctuantes d'une année sur l'autre et l'enneigement



Le lac de Mélo est situé à un peu plus de 1 700 m d'altitude. Sa surface gèle en hiver et les sommets montagneux qui l'entourent sont enneigés.

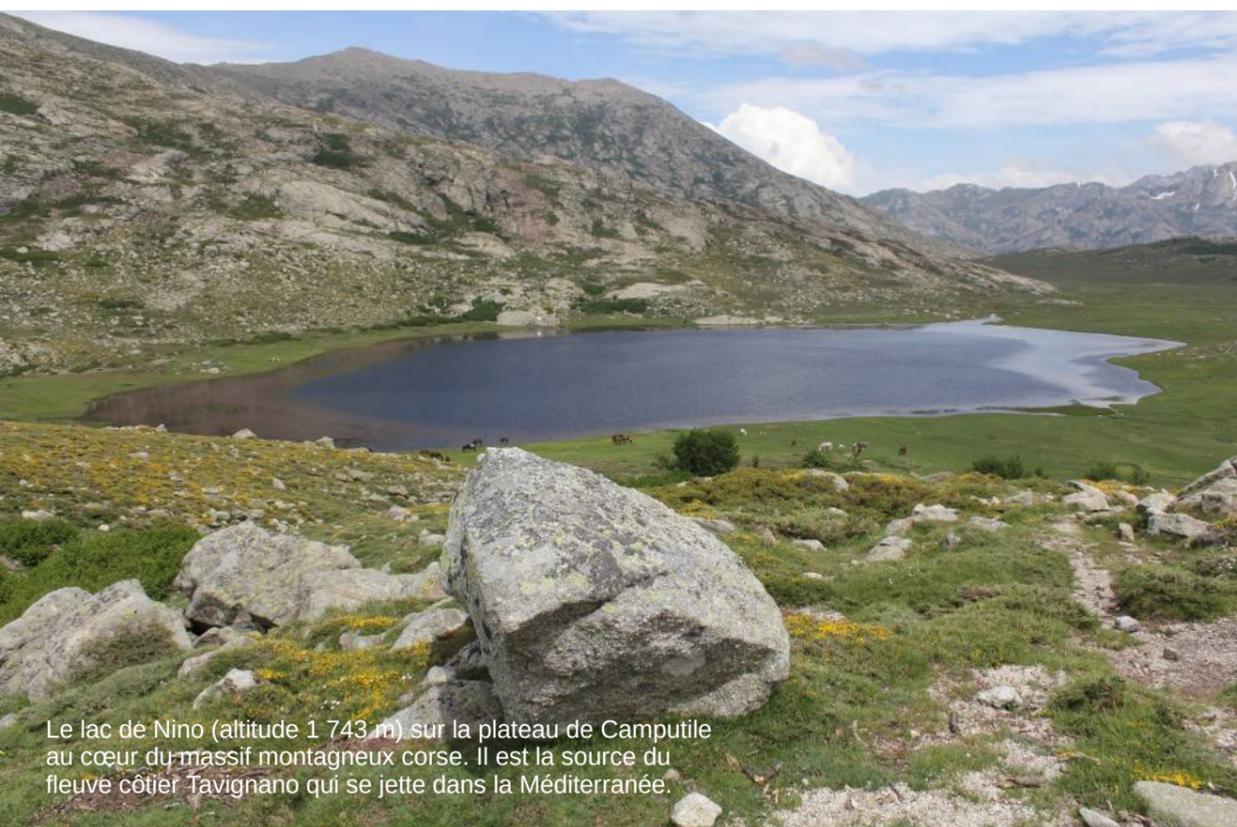
très variable. La hausse des températures en altitude ces dernières années, dû au réchauffement climatique, engendre un recul en altitude de la limite pluie/neige.

Transport d'eau

Lorsque la température devient positive, la neige fond et ravine le relief. Ce déplacement d'eau érode ce dernier sur des milliers d'années et façonne le flanc des montagnes. Lorsque le relief forme une cuve, la fonte des neiges et la pluie alimentent un lac qui lui-même sera la source d'une rivière ou d'un fleuve côtier**. La fonte des neiges en altitude n'est pas la seule source de formation des cours d'eau. La pluie est également source d'érosion.

La quantité de précipitations sous la forme de pluie est calculée en millimètres (mm). Un millimètre de pluie

correspond à un litre de précipitations sur une surface d'un mètre carré. En 2019, les précipitations pluvieuses sur la totalité de la Corse s'élevaient à 219 millimètres ce qui est bien inférieur à la moyenne nationale qui est de 312 millimètres. Le régime de pluies de l'île est cependant irrégulier avec de longues périodes de sécheresse ponctuées de précipitations orageuses importantes. Le bouleversement climatique globale a une influence très visible sur le système hydrographique de la Corse. Les précipitations annuelles ont diminué de 20 à 30 % au cours des 40 dernières sur l'ensemble de l'île. En parallèle, les événements extrêmes, comme les crues, sont plus nombreux et plus fréquents. De plus, l'étiage*** dure plus longtemps : cinq mois depuis 1984 au lieu de trois précédemment.



Le lac de Nino (altitude 1 743 m) sur la plateau de Camputile au cœur du massif montagneux corse. Il est la source du fleuve côtier Tavignano qui se jette dans la Méditerranée.



La rivière du Manganellu dans la forêt de Vizzavona située au centre de la Corse.

L'eau s'écoule le long de la pente du relief sous l'effet de la gravité. L'eau issue de la fonte des neiges forme des ruisseaux dans le creux du relief, puis se rejoignent pour former des rivières et ces dernières font de même pour former des fleuves qui se jettent dans la mer. Cet ensemble hydrographique est appelé un bassin versant. Par exemple, en France, les ressources en eau douce sont gérées par bassin versant par les Agences de l'Eau. En Corse, il n'existe pas à proprement parlé de bassin versant. Les fleuves côtiers naissent directement de la fonte des neiges et de petits lacs d'altitudes à quelques dizaines de kilomètres de leur embouchure sur le littoral de l'île. Ce réseau d'eau douce est d'une importance cruciale pour l'île que ce soit en terme de production d'électricité (quatre grands barrage sont construits sur l'île), d'irrigation des cultures, d'apports en eau potable et de biodiversité.

Toute l'eau issue des précipitations ne termine forcément dans un cours d'eau. Une partie s'infiltre dans le sol par les failles menant à des cavités souterraines où l'eau est stockée ; ce sont les nappes phréatiques. Le temps de résidence de l'eau dans ces réserves est variable selon la nature du sol. Il peut aller de quelques années à plusieurs dizaines. De plus, une partie de cette eau circule via un réseau de rivières souterraines qui peuvent relier plusieurs cavités les unes aux autres (comme les fameux cénotes de la péninsule du Yucatan u Mexique).

Retour à la mer

Il est maintenant temps de terminer notre voyage à travers du cycle de l'eau de la Corse. Toutes les eaux finissent par retourner à la mer. Les fleuves terminent leur course dans la mer, créant des eaux dites « saumâtres » disposant d'une

Zone humide en arrière de la plage d'Osani le long du sentier menant à Girolata.



Dans les années à venir, la vie des corses et l'économie de l'île vont subir de profonds bouleversements du fait de ces changements qui ne cessent de s'accroître avec l'emballement du processus de dérèglement climatique global. Les perturbations observées à l'échelle de la Corse se produisent également à l'échelle mondiale. Les changements du cycle de l'eau sont très étudiés par les scientifiques car c'est ce processus qui régule l'apport en eau douce sur notre planète. Les ramifications d'un tel bouleversement sont innombrables et dramatiques et peuvent mener à de nouveaux conflits, de graves problèmes sanitaires et la survie de la biodiversité dans certains secteurs géographiques.

Glossaire

*Gradient thermique adiabatique : variation de la température de l'air avec l'altitude. Ce gradient s'exprime en °C/100 m.

**Fleuve côtier : petit cours d'eau qui prend naissance à proximité de la côte et se jette directement en mer.

***Étiage : période durant laquelle un cours d'eau atteint son plus bas niveau.

salinité intermédiaire. En Corse, l'embouchure des fleuves côtiers forment de petites zones humides (parfois saisonnières). Ces dernières abritent une biodiversité unique d'oiseaux, de reptiles, d'amphibiens et d'insectes. Les changements du régime pluviométrique décrits plus haut, en lien avec le réchauffement climatique, menacent à court terme la survie de ces espèces.

Les fleuves charrient vers la mer de nombreux éléments dissous qui participent à la concentration et à la composition de la salinité marine au même titre que l'évaporation. Malheureusement, ils déversent également nos pollutions chimiques liées à l'agriculture et à nos zones urbaines. C'est également l'un des principaux vecteurs de transport de nos déchets qui se déposent inexorablement sur les fonds côtiers. Les courants marins peuvent également les transporter jusque dans les

abysses. En Corse, l'activité agricole étant relativement limitée, les cours d'eau transportent peu de pollution. En revanche, les déchets jetés dans les espaces naturels se retrouvent dans les ruisseaux et les rivières au premier orage venu.

Les eaux souterraines retournent également à la mer. Ce type d'apport d'eau douce dans l'océan est appelé une « résurgence ». Cette dernière est une porte d'accès vers le réseau aquifère très prisée des plongeurs spéléologiques et des scientifiques.

Le mot de la Fin

Comme vous l'avez certainement compris en lisant ces quelques mots, les perturbations du cycle de l'eau par le changement climatique impactent, ou impacteront, chacun des nombreux secteurs de l'environnement en Corse.



Les eaux marines cristallines de la baie de Calvi.



La glace et la neige recouvrent les montagnes à proximité du lac de Mélo en hiver.



Les nuages venant du large sont porteurs de pluie sur la petite ville de l'Île Rousse.

Pour en savoir (beaucoup) plus

Oki T., Kanae S. (2006) Global hydrological cycles and world water resources. Science 313 (5790): 1068-1072

Orsini A., Mori C. (2018) Changement climatique et milieu marin en Corse. Report Card 2018. IUCN

Roderick M., Sun F., Lim W. H., Farquhar G. (2014) A general framework for understanding the response of the water cycle to global warming over land and ocean. Hydrology and Earth System Sciences 18: 1575-1589

Schlesinger W. H., Jasechko S. (2014) Transpiration in the global water cycle. Agricultural and Forest Meteorology 189: 115-117



Les eaux claires de la Figarella s'écoulent dans la forêt de Bonifatu en Haute-Corse.

LES RÉCIFS ARTIFICIELS



Les récifs artificiels prennent de nombreuses formes selon leur utilité. Cependant, leur fonction d'agrégateur de vie marine n'est pas assurée lorsque les conditions environnementales ne s'y prêtent pas. D'autres récifs artificiels n'ont pas pour vocation première de générer une oasis de vie comme les récifs anti-chalutage, ou bien les récifs artistiques comme ceux composés de sculptures. Quelques exemples malheureux du passé nous ont également prouvé que la frontière entre récif artificiel et dépôt de déchets sous-marins est parfois mince, et que l'implantation de structures artificielles comme compensation des destructions engendrées par nos activités n'est pas une mesure suffisante.

Texte et photos : Arnaud Abadie

Conservation

Une très large définition

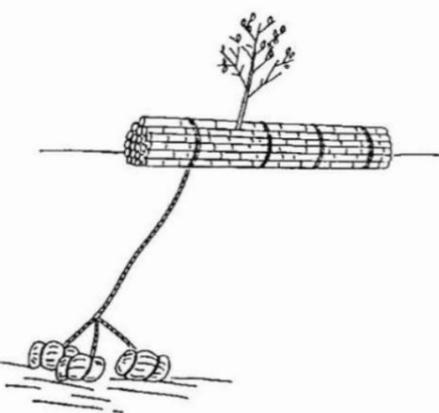
Qu'est-ce qu'un récif artificiel ? C'est un objet immergé volontairement à des fins d'étude, de protection ou de recolonisation des fonds marins. Les épaves issues des fortunes de mer ne sont donc pas des récifs artificiels, cependant certains experts les considèrent comme tel du fait de leur rôle et de leur fonctionnement très similaire. Leur forme la plus classique est celle de cubes de bétons ou d'enrochements déposés sur les fonds marins. Si l'engouement des dernières années pour ces structures immergées - très souvent en « compensation » de nos activités destructrices de vie marine - a entraîné des évolutions notables dans leur forme, leur utilisation et les matériaux dont elles sont constituées, les premières utilisations de récifs artificiels sont beaucoup plus anciennes et remontent au Moyen-Age.

Les japonais sont les précurseurs dans le domaine même si à cette époque, vous vous en doutez, le but n'était pas de

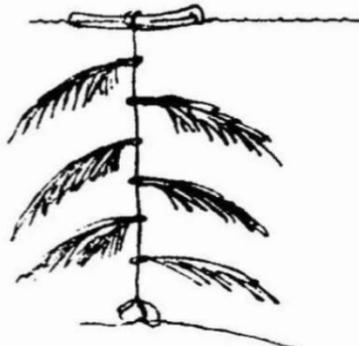
protéger ou repeupler les fonds marins. Les premiers récifs artificiels prenaient la forme de structures immergées ou flottantes en bambou mises en place par les pêcheurs. Ce type de dispositif est né de l'observation du fait que les petits poissons du large trouvent naturellement refuge à l'abri de tout objet flottant (tronc d'arbre, feuillage et autres débris naturels terrestres). Ce menu fretin attire ses prédateurs qui eux-même attirent leurs prédateurs et ainsi de suite jusqu'aux organismes aux sommet du réseau trophique* (requins, gros poissons pélagiques). Ce type de récif artificiel est toujours utilisé par les pêcheurs dans le monde entier et portent le nom de dispositif de concentration de poisson (DCP).

Les récifs modernes ont également été développés au Japon dans les années 1950 et depuis cette époque un programme très ambitieux, étalé sur plusieurs décennies, se poursuit avec à ce jour plusieurs centaines de modèles de récifs brevetés, et plus de 12 % du

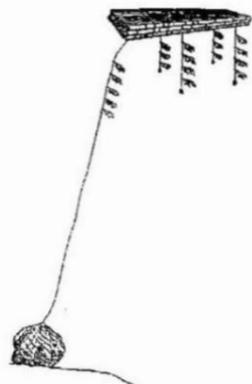
Bien que ce toilette trône sur les fonds marins (si vous me permettez l'expression) et est colonisé par des organismes fixés, il ne constitue pas un récif artificiel selon la définition la plus couramment admise car son implantation n'est pas intentionnelle.



Le "Tsukegi" du Japon d'après Kaneda (1986)



Le "Rumpong" d'Indonésie



Le "Unjang" de Malaisie d'après Bergstrom (1983)

Différents modèles de récifs artificiels traditionnels d'Asie. D'après Taquet (2000).

plateau continental des eaux japonaises occupées par ces dispositifs. En Europe (principalement en Méditerranée), les premiers récifs artificiels modernes voient le jour dans les années 1960 mais restent des déploiements de faible ampleur à l'échelle locale. C'est dans les années 1980 que les premiers projets d'envergure ont vu le jour en France. Ainsi, à partir de 1985, environ 50 000 m³ de modules en béton armé ont été immergés en Languedoc et en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

Ces premiers programmes d'envergure ont ouvert la voie à un effort à l'échelle mondiale pour concevoir et déployer des récifs artificiels. Malheureusement, cet engouement a également donné lieu à de véritables abus se traduisant par des dépôts de déchets sous-marins cautionnés par les gouvernements.

Fausse bonnes idées et dépotoirs sous-marins

Dans les années 1970, le gouvernement des États-Unis a immergé des milliers de pneus au large de Fort Lauderdale (Floride) en vue de fournir un support de colonisation à la vie marine (et aussi de se débarrasser de ses pneus usagés). Bien évidemment la surface lisse des pneus n'est absolument pas favorable à l'implantation des organismes marins fixés. Ne pouvant pas assurer leur rôle de substrat pour les premiers stades de colonisation, ces pseudo-récifs ne remplissent pas leur fonction première. En plus d'être inefficaces, les pneus sont toxiques pour l'environnement marin étant à 40 % constitués de caoutchouc synthétique et de composés chimiques divers issus du pétrole. Les pneus sont

reliés entre eux par des câbles en métal qui rouillent et se détruisent au cours du temps. Les pneus sont alors désolidarisés et sont transportés par les courants. Ils finissent alors par polluer des habitats marins naturels ou par s'échouer sur les plages.

Cette malheureuse tentative de transformer des déchets en récifs artificiels n'a pas eu lieu qu'aux États-Unis mais également en Australie, en Nouvelle-Zélande et en Malaisie avec (sans surprise) le même constat d'échec. Notre littoral n'est pas épargné par des dispositifs aussi ineptes. Entre 1980 et 1989, environ 25 000 pneus ont été immergés pour former un récif au large du golfe de Juan dans les Alpes Maritimes. Face à la menace de la contamination des écosystèmes alentours par les métaux lourds relargués par la décomposition des pneus, une opération de récupération des pneus a démarré en 2015. Cette opération, prévue pour ce terminer en 2020, est réalisée principalement à la main par des scaphandriers professionnels. La récupération de ces pneus coûte 1 200 000 € pris en charge par l'Office français de la biodiversité et la fondation Michelin.

Les pneus ne sont pas la seule partie de nos véhicules que nous avons essayé de maquiller en récifs artificiels. Des carcasses de voitures ont été immergées au large de Palavas-les-Flots entre 1968 et 1969 à environ 20 m de profondeur. Résultat des courses (de voiture) : les épaves se désagrègent en deux ou trois ans sans jamais constituer un support efficace pour la colonisation de la vie marine. Sans parler de la pollution induite par les composés chimiques de la peinture et des métaux lourds de la carrosserie. Dès les années 1970 l'inefficacité de ce dispositif est scientifiquement pointé du doigt et le rejet de ce type de déchets a été rapidement abandonné en France.

D'autres dispositifs apparentés à des dépôts de déchets ont été testés

jusque dans les années 1980 sur les côtes française tels que des petites structures en plastique. L'un des seuls avantages de ces tests, pour le moins non-concluants, a été de diriger l'effort de recherche vers des structures sous-marines plus adaptées à leur colonisation par la faune et la flore sous-marine.

Repeupler les fonds avec du béton (mais pas que)

Fort heureusement, en parallèles de ces expériences malheureuses, les 40 dernières années ont donné lieu à une profonde réflexion sur la conception et la fonctionnalité des récifs artificiels, notamment concernant ceux dits « de production ». Ces derniers ont pour but de fournir un substrat à la faune et la flore fixée sous-marine et de recréer ainsi un écosystème entier y compris l'ensemble des invertébrés et des poissons vivant naturellement à proximité des habitats rocheux. Ces récifs peuvent avoir plusieurs utilités en terme de conservation : repeupler les fonds marins pour la pêche professionnelle ou la pêche de loisir, créer des sites de plongée sous-marine, étudier le repeuplement des fonds par une espèce particulière (comme les langoustes) ou compenser des destructions irréversibles dans le cadre de la construction d'infrastructures en milieu littoral (ports, digues, plages artificielles).

La plupart du temps ces récifs sont constitués de béton armé qui a l'avantage d'être solide et de disposer d'une surface rugueuse propice à l'accrochage des organismes marins colonisateurs amenés par les courants. Les récifs sont le plus souvent de forme rectangulaire ou cubique. Les dernières innovations en matière de conception favorisent des formes arrondies et une complexification de la forme afin de recréer l'hétérogénéité des roches sous-marines. Ces structures de base peuvent être améliorées en y ajoutant par exemple des jarres (pour abriter des poulpes), des filets remplis de



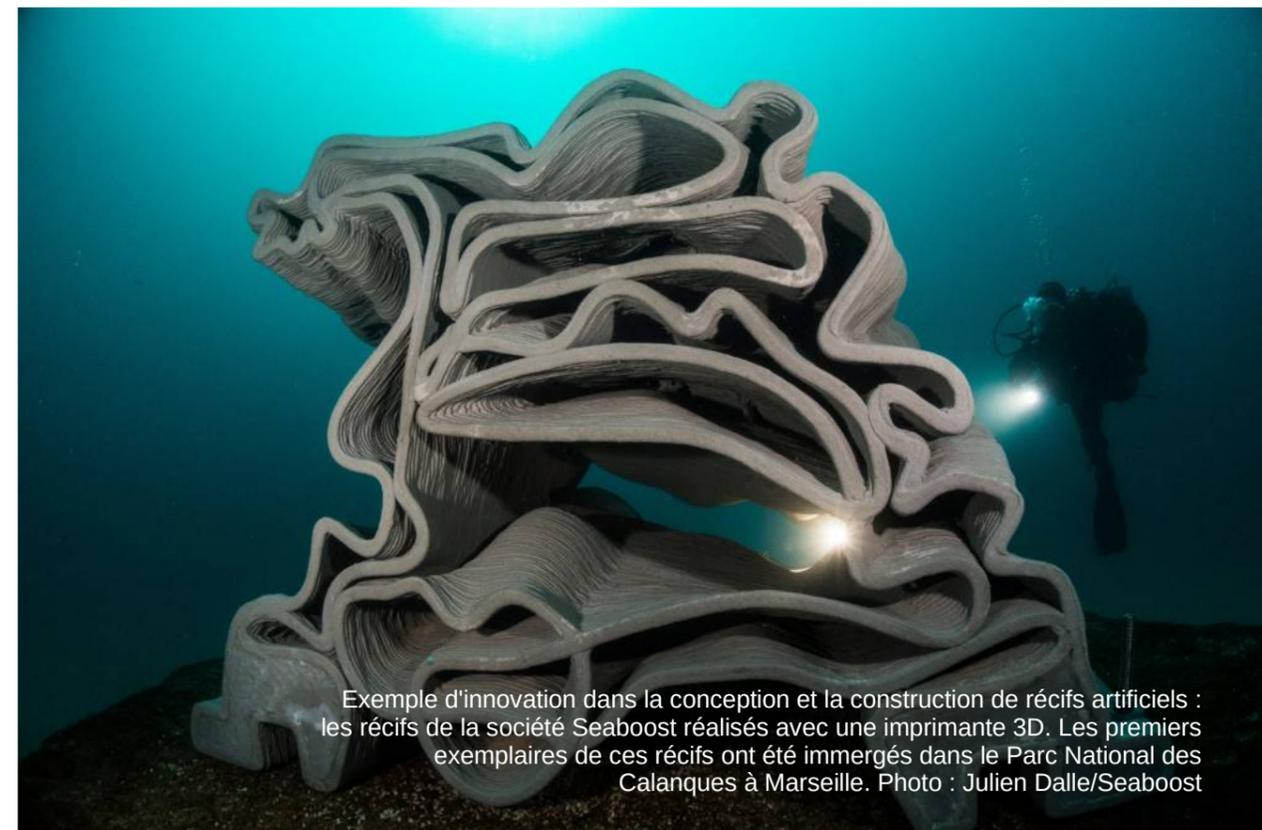
Opération de récupération sur un récif de pneus en 2005 au large de Fort Lauderdale en Floride. Photo : CC Matthew Hoelscher.

Les récifs artificiels

Les structures artificielles ne sont pas forcément des structures imposantes. De petits récifs permettent de remplacer des roches naturelles de petite taille et fournir des abris à de nombreux organismes marins de petite taille. Ces récifs sont installés à très faible profondeur dans la Réserve Naturelle de Petite Terre en Guadeloupe.



Récif artificiel construit dans un but scientifique afin d'étudier le processus de colonisation des individus juvéniles de langouste dans la baie de Calvi (Corse).



Exemple d'innovation dans la conception et la construction de récifs artificiels : les récifs de la société Seaboost réalisés avec une imprimante 3D. Les premiers exemplaires de ces récifs ont été immergés dans le Parc National des Calanques à Marseille. Photo : Julien Dalle/Seaboost

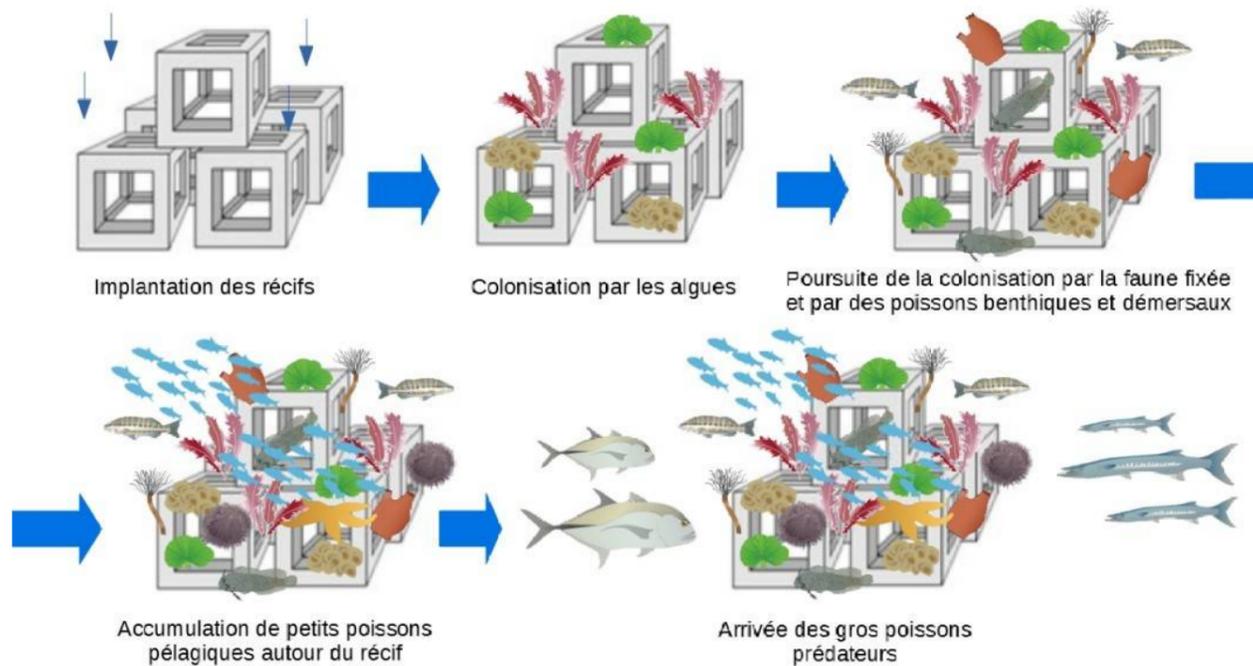
Conservation

coquilles vides de bivalves (pour abriter les petits organismes benthiques**) ou des bouts (cordes) flottant dans la colonne d'eau (pour les pontes de céphalopodes). Les récifs artificiels sont implantés en réseau, c'est à dire en groupements avec un espacement entre chaque construction permettant la circulation des organismes marins. Ce type d'installation permet également de couvrir une zone plus large.

Si les conditions environnementales sont favorables, la colonisation des structures immergées est très rapide. Dès les premières semaines des algues vont se développer sur les parois en béton. Au cours de la première année d'autres organismes vont venir se fixer sur le récif comme des éponges et des bryozoaires. En moins de deux ans c'est toute une chaîne alimentaire qui se met en place et chaque abri fourni par les anfractuosités est occupé par des petits

organismes benthiques. Finalement, en quelques années les plus gros poissons prédateurs sont également présent à proximité des récifs. Lorsque la concentration en organismes mobiles (par exemple les poissons pélagiques et benthiques, les langoustes, les poulpes) devient trop importante dans le périmètre d'implantation des structures, ils sortent alors de la zone protégée des récifs pour coloniser les habitats naturels aux alentours ou bien sont capturés par les pêcheurs.

Les récifs artificiels ne sont pas éternels et possèdent ainsi un cycle de vie d'une trentaine d'année (variable selon leur conception, leurs matériaux de construction et leur fonction). En effet, bien que la structure en béton assure une certaine solidité, les armatures en métal sont vouées à se corroder et à entraîner l'effondrement des récifs en se détruisant. En perdant leur structuration



Étapes de colonisation des récifs artificiels par les organismes marins.



Les récifs artificiels sont très rapidement colonisés comme sur les récifs du Prado à Marseille où de nombreuses ascidies rouges (*Halocynthia papillosa*).



Les récifs artificiels

en trois dimensions, les récifs perdent ainsi leur capacité à agréger la vie marine (moins de surfaces à coloniser et de trous pour protéger les espèces benthiques). De plus, certains organismes fixés produisent de l'acide sulfurique capable de percer le béton et de le fragiliser. Le substrat sur lequel sont déposés les récifs est également très important car il conditionnera sa stabilité au cours du temps et donc par extension sa durée de vie. Les substrats durs tels que la roche sont exclus car, non seulement le récif posé dessus sera instable, mais également parce que ces substrats assurent naturellement une fonction d'agrégateur de vie marine. De même les herbiers sous-marins, qui font partie des écosystèmes les plus riches des océans, n'ont pas besoin d'implantation de récifs

artificiels (même si cela à été fait quand même) et sont bien souvent protégés par la loi. Le sédiment compact reste le meilleur substrat d'implantation pour les récifs avec cependant un risque d'envasement s'il est trop meuble (comme par exemple la vase).

Sabordage volontaire

Comme mentionné précédemment, les épaves issues des fortunes de mer entraînant le chavirage d'un navire ou le crash d'un avion ne sont pas des récifs artificiels stricto sensu, car leur implantation n'est pas intentionnelle. Cependant, le sabordage volontaire de navires pour peupler les fonds marins est lui considéré comme une installation de récifs artificiels. En revanche, il ne suffit



Exemple de complexification d'un récif artificiel de la rade de Marseille. Le filet permet notamment la fixation de bryozoaires et les coquilles qu'ils contiennent protègent les poissons de petite taille.

pas de faire un trou dans la coque d'un navire et de le regarder couler au hasard sur le fond. Tout comme la mise en place de récifs en béton, ces opérations sont minutieusement préparées afin de maximiser l'efficacité d'attraction d'organismes marins.

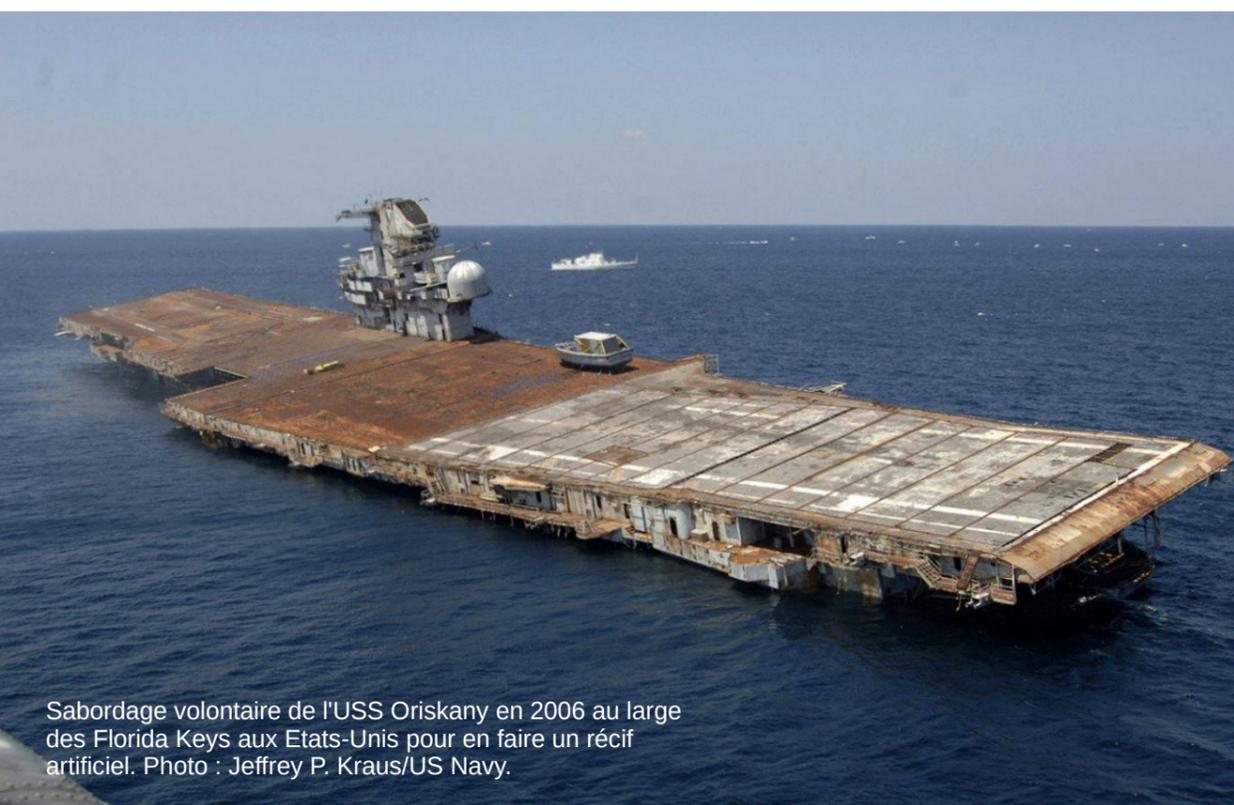
Tout d'abord, il faut définir un site d'implantation de la même manière que pour des récifs conventionnels : caractéristiques du substrat, proximité avec d'autres habitats marins, disponibilité de nutriments et de lumière. Dans un second temps, un navire retiré du service est sélectionné afin de servir d'épave/récif. Tout type de navire est éligible. Le plus souvent ce sont des navires militaires ou d'autorités (autorités portuaires, garde-côtes). Quand à la taille, cela va du petit remorqueur de quelques dizaines de mètres jusqu'au porte-avions de 300 m de long. Une fois les caractéristiques du projet définies, le navire est ensuite dépollué afin d'ôter tout

matériel ou tout composant pouvant entraîner une pollution du milieu marin (électronique, peinture, amiante, plomb, métaux lourds). Enfin, le bateau est sabordé de façon à ce qu'il repose sur sa quille à l'endroit exact défini dans le projet. Reste ensuite à laisser la vie marine coloniser ce nouvel habitat, ce phénomène se déroulant à la même vitesse que pour des structures en béton.

Les premiers à avoir immergé volontairement des navires pour en faire des récifs artificiels sont les Japonais au XVII^{ème} siècle. Dans l'histoire moderne, les plus actifs dans le sabordage d'anciens navires sont les États-Unis qui n'hésitent pas à en déposer sur les fonds des eaux du Golfe du Mexique. Cela concerne principalement des anciens navires militaires avec notamment l'immense porte-avions USS Oriskany de 275 m de long sabordé en 2006. Ce sont ainsi des dizaines de bâtiments militaires qui ont été coulés principalement au large de l'archipel des



Épave du P29 dans les eaux maltaises. Ce petit patrouilleur a été volontairement coulé au nord de l'île en 1994. Tout comme les autres épaves sabordées intentionnellement, celle-ci attire fortement les touristes plongeurs. Photo : François Remy.



Sabordage volontaire de l'USS Oriskany en 2006 au large des Florida Keys aux États-Unis pour en faire un récif artificiel. Photo : Jeffrey P. Kraus/US Navy.

Florida Keys.

Les maltais ne sont également pas en reste en ce qui concerne la création de récifs artificiels à partir d'anciens navires. En effet, malgré la richesse en épaves des fonds marins de l'île des deux guerres mondiales – du fait de la position stratégique de Malte en Méditerranée – une douzaine d'épaves ont été immergées depuis 1992. Pourquoi saborder des navires alors que de nombreuses épaves reposent déjà au large de l'île ? Tout simplement parce que la majorité d'entre elles se trouvent à des profondeurs que la majorité des plongeurs de loisir ne peuvent pas atteindre. C'est donc dans un but purement récréatif que ces bâtiments ont été coulés, la capacité des ces épaves à se transformer en récifs artificiels productifs étant secondaire.

De par le monde la folie du sabordage de navires est contagieuse et de plus en plus dans le but de plaire au tourisme de masse plutôt que de compenser les destructions sous-marines que nos activités engendrent. Ainsi, un parc d'attraction subaquatique a ouvert ses portes au large du Bahreïn à l'été 2019. Ce parc sous-marin a pour attraction principale un Boeing 747 de 70 m de long. Et la France dans tout ça ? Si elle n'est pas en reste lorsqu'il s'agit d'installer des récifs artificiels de forme classique, elle l'est beaucoup moins lorsqu'il est question du sabordage d'anciens navires. En effet, refroidie par les abus de dépôt de déchets déguisés en récifs artificiels dans les années 70 et 80, il est désormais interdit d'immerger tout objet apparenté à une épave. Si en

Conservation

théorie des dérogations sont possibles, le processus administratif est si long et si complexe qu'à ce jour aucune épave récif artificiel n'existe en France, même si quelques bâtiments ont été volontairement sabordés par la marine nationale il y a plusieurs dizaines d'années.

L'art au service de la vie marine

Une seconde forme récréative des récifs artificiels, beaucoup plus récente que les autres, est beaucoup plus surprenante : l'immersion de sculptures sous-marines dans un but artistique (et lucratif aussi il faut bien l'admettre). Le précurseur de cette pratique est le sculpteur anglais Jason deCaires Taylor qui, en 2006, a immergé à Molinere Bay (île de la Grenade) plusieurs sculptures

afin de constituer un musée sous-marin. Un second musée subaquatique est inauguré par l'artiste en 2010 au large de Cancun au Mexique (le Museo Subacuático de Arte ou MUSA). Il comporte plus de 500 sculptures représentant des êtres humains et des objets symbolisant notre monde moderne dans tous ces aspects. Si l'intérêt artistique des ces récifs est indéniable, l'aspect environnemental du projet est plus difficile à cerner au vu de la faible colonisation des sculptures et de la proximité d'écosystèmes très riches à proximité (herbiers, récifs coralliens). En revanche, le côté lucratif est indéniable avec plus de 200 000 visiteurs par an et une offre de forfaits de visite à plusieurs dizaines de dollars (et oui comme tout musée il faut en payer l'entrée). Les profits sont cependant utilisés par le musée afin d'enrichir sa collection de sculptures et mener des actions de recherche

scientifique.

Un troisième musée, toujours conçu par Jason deCaires Taylor, a ouvert ses portes en 2016 au large de l'île de Lanzarote dans l'archipel des Canaries. Son nom : le Museo Atlantico. Ce musée est très similaire au MUSA en ce qui concerne les thématiques abordées et le mode de visite avec une entrée payante ainsi qu'un parcours à suivre entre les œuvres. Si peu d'organismes fixés, à part quelques algues, colonisent les statues, de nombreux poissons de toutes les tailles déambulent avec les visiteurs du musée.

Enfin, un nouveau musée sous-marin devrait être inauguré à Marseille à l'été 2020. Mais qui est l'artiste à l'origine des sculptures immergées ? Et bien ce n'est pas Jason deCaires Taylor pour une fois ! Ce dernier était initialement le concepteur du musée mais, face à la

Les récifs artificiels

lenteur de l'avancement du projet, son musée français devrait voir le jour du côté de Cannes. Ce sont donc des artistes français locaux qui sont à l'origine des sculptures qui seront immergées à Marseille dont Daniel Zanca et Marc Charbonnel. Ce projet, qui devait voir le jour en 2017, a été retardé par la lourdeur des procédures administratives obligatoires pour immerger des objets sur le domaine public maritime français. Une dizaine de statues humaines de 2 m de haut seront ainsi immergées à une profondeur de 5 m sur une surface de 2 500 m².

Obstacle au chalutage illégal

Nous venons de voir que les récifs artificiels peuvent avoir un rôle de production pour repeupler les fonds, fournir des ressources halieutiques à la



Une des sculptures du MUSA de Cancun (Mexique) dépeignant notre vie quotidienne en version sous-marine. Photo : CC Julie Rohloff.



Ensemble de sculptures du Museo Atlantico de Lanzarote (Canaries). Ces formes errantes se dirigent vers un mur, très similaire à celui séparant les États-Unis et le Mexique, avec comme seule issue un large portail en son centre. La thématique des migrants est très présente dans ce musée inauguré en mars 2016.



Récif anti-chalut dans la baie de La Ciotat. Plusieurs de ces récifs sont disposés en ligne entre le large est un ensemble de récifs de production afin de les protéger du chalutage illégal. Photo : Seaviews.

pêche ou bien aussi pour soutenir les activités touristiques liées à la plongée à travers l'immersion de navires ou de sculptures sous-marines. Ils ont cependant une autre fonction primordiale : la préservation de zones protégées du chalutage illégal. Contrairement aux autres récifs, il ne sont pas conçus pour être colonisés par la vie marine mais pour piéger les filets des chaluts. En France le chalutage est interdit au dessus de certaines profondeurs pour protéger les habitats marins sensibles tels que les herbiers de posidonies. Malheureusement, cette loi était contournée par une minorité de pêcheurs qui chalutaient dans des aires marines protégées et sur certains biotopes fragiles. De nos jours, grâce au système de positionnement des navires (l'AIS***),

le nombre de navire ne respectant pas cette réglementation a très fortement diminué.

Les récifs anti-chalut sont d'une taille relativement réduite et prennent le plus souvent la forme d'une structure en béton érigée afin de retenir le filet de l'engin de pêche traîné sur le fond. Ceux installés il y a plusieurs dizaines d'années sont toujours en place et remplissent toujours leur office dans certains cas. Ils sont généralement placés en périphérie des aires marines protégées au sein desquelles toute forme de pêche est interdite comme par exemple autour du Parc Marin de la Côte Bleue au nord de Marseille. Ces structures sont également placées autour des récifs de production pour empêcher toute pêche illégale et pour leur permettre de remplir leur office

et ainsi fournir des ressources halieutiques sur le long terme.

Le mot de la Fin

Comme vous l'aurez compris en lisant cet article, les récifs artificiels, sous toutes leurs formes, apparaissent comme de prodigieux outils pour protéger et repeupler les fonds marins. Leur forme et leur mode de fabrication évoluent en permanence grâce à l'informatique et aux imprimantes 3D. Ils ne sont d'ailleurs plus l'apanage du milieu marin, des récifs artificiels étant installés en douce depuis quelques années. Cependant, aussi performante que soit cette technique, son efficacité reste mineure comparée aux services écosystémiques fournis par les écosystèmes marins lorsqu'ils sont dans un bon état écologique. De plus les récifs artificiels sont souvent employés comme seule mesure de compensation lors de projets de construction en zone littorale engendrant la destruction d'habitats marins. Dans la grande majorité, ces mesures de compensation sont inefficaces au regard de l'importance fonctionnelle des habitats détruits.

Glossaire

*Réseau trophique : chaîne alimentaire au sein de laquelle l'énergie et la biomasse circule. Cette circulation d'éléments se fait de façon alimentaire par la relation proie/prédateur mais également par les autres processus naturels permettant à un organisme de fabriquer de la biomasse.

**Organismes benthiques : espèces marines vivant sur le fond.

***AIS : Automatic Identification System. Système de traçage des navires pour assurer leur sécurité.

Pour en savoir (beaucoup) plus

Deluzarche C. (2018) Récif artificiel : le fiasco des pneus en mer dans les Alpes-Maritimes. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/natura-2000-recif-artificiel-fiasco-pneus-mer-alpes-maritimes-58205/>

Francour P. (2018) Les récifs artificiels : visions modernes d'un concept vieux de plusieurs siècles. Conférence du Musée Océanographique de Monaco (pdf)

Lima J. S., Zalmon I. R., Love M. (2019). Overview and trends of ecological and socioeconomic research on artificial reefs. Marine environmental research.

Tessier, A., Francour, P., Charbonnel, E., Dalias, N., Bodilis, P., Seaman, W., & Lenfant, P. (2015). Assessment of French artificial reefs: due to limitations of research, trends may be misleading. Hydrobiologia, 753(1), 1-29



La vie foisonne autour des récifs artificiels artistiques du Museo Atlantico au large de Lanzarote.



Les récifs artificiels prennent de nombreuses formes comme ces bouts équipés de flotteurs immergés dans la rade de Marseille.

LA PHOTOGRAMMÉTRIE SOUS-MARINE



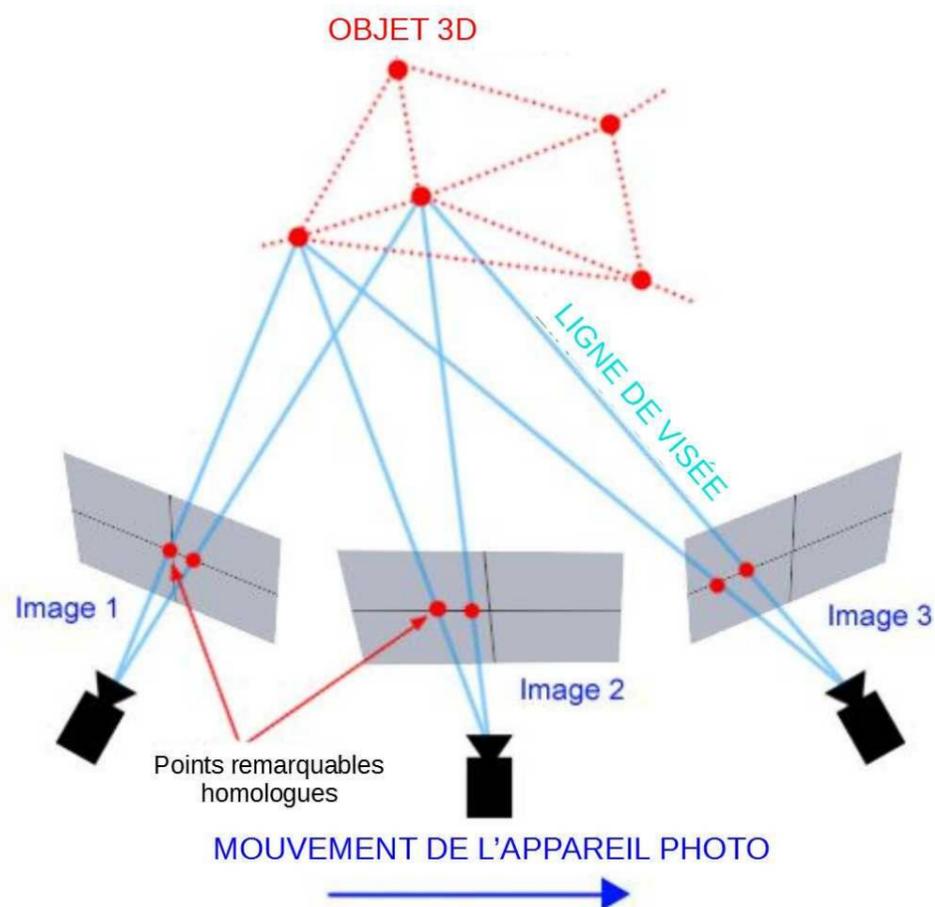
La photogrammétrie. Derrière ce terme abscons ce cache une technique utilisée couramment sur le plancher des vaches pour reconstituer des scènes en trois dimensions à partir de photographies. De nombreux domaines sont concernés par cette étonnante technologie dont notamment l'archéologie, la topographie 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

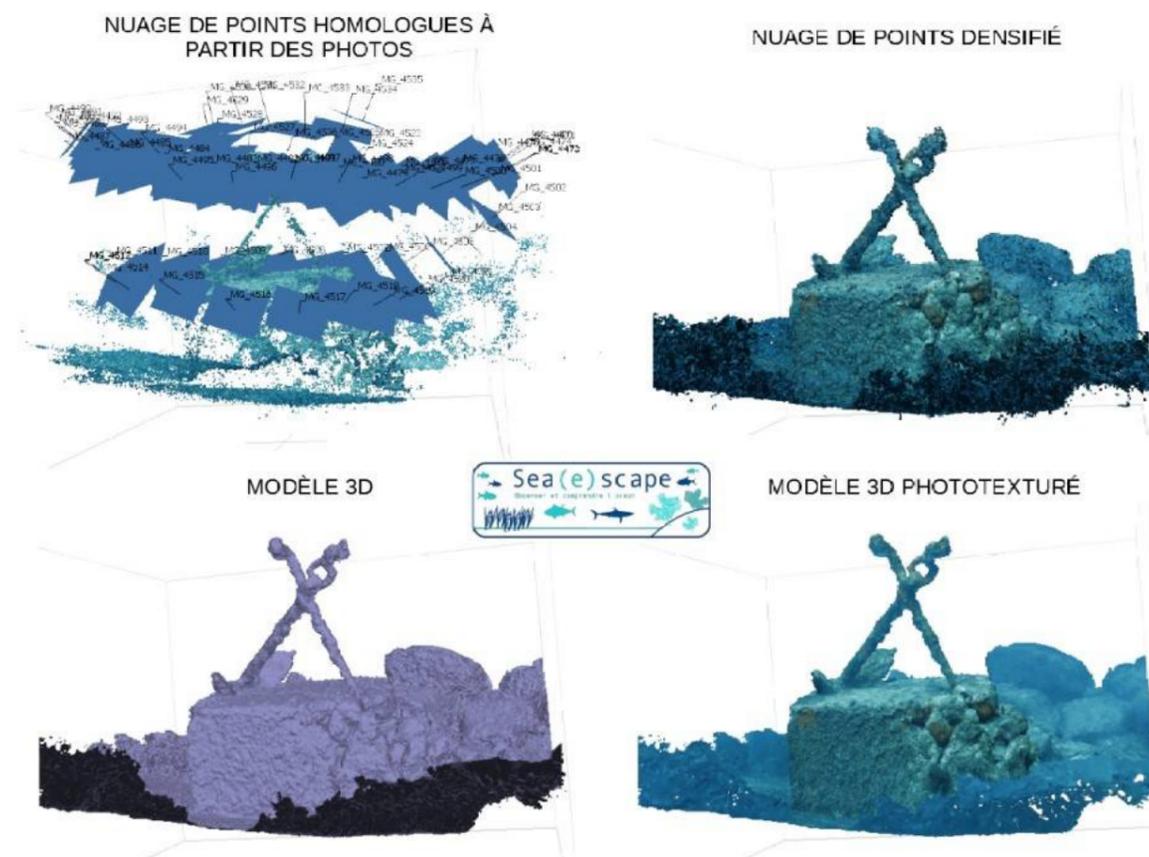
Une technique pas si récente Finalement

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

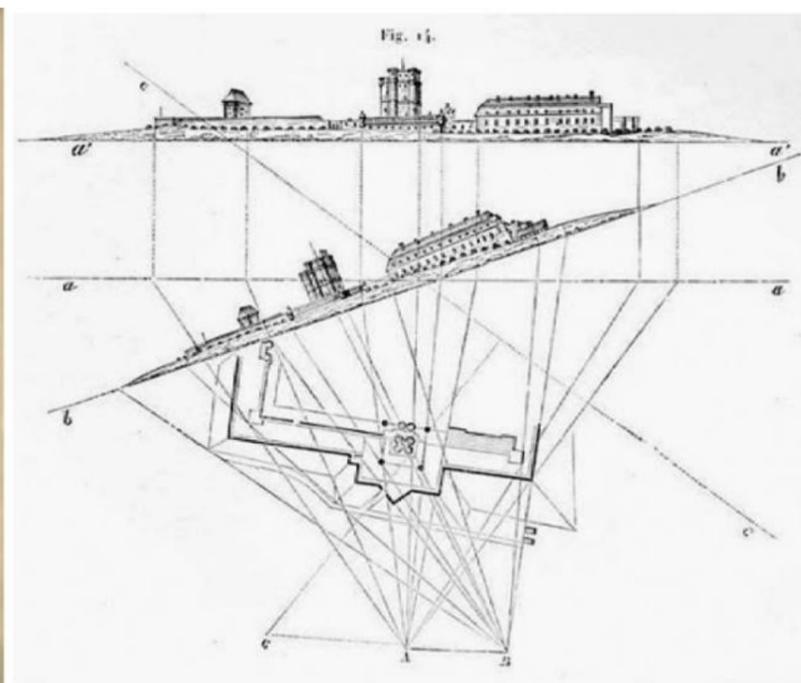
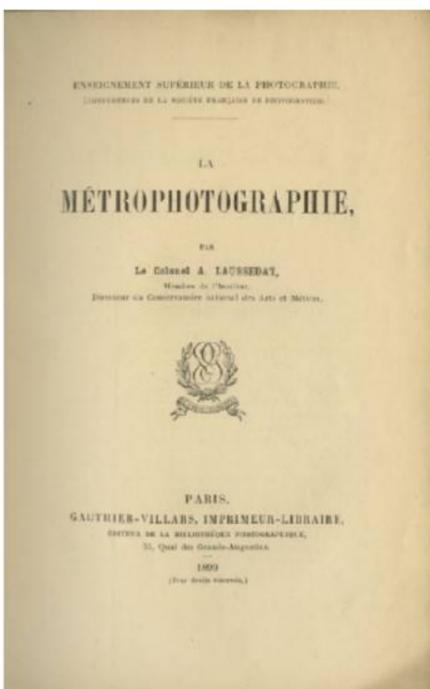
La photogrammétrie sous-marine

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.

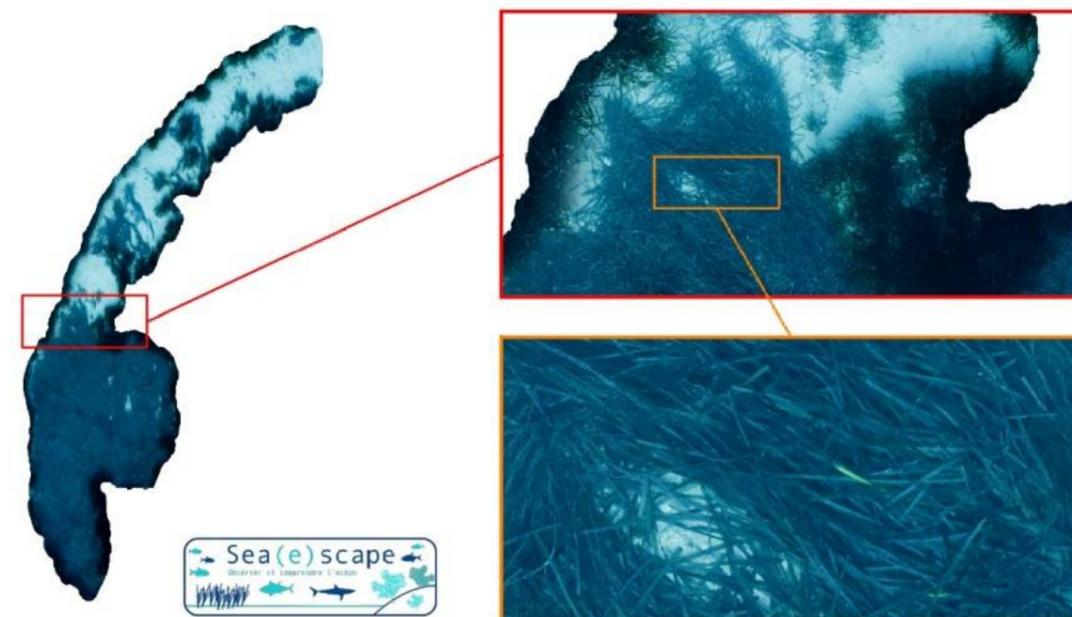
Trois options de prises de vues sont possibles pour faire de la photogrammétrie sous-marine ; photographier depuis la surface, en plongée sous-marine avec un scaphandre autonome ou avec un ROV***. Une quatrième option par drone aérien pour les habitats marins affleurant la surface de l'eau est possible, 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

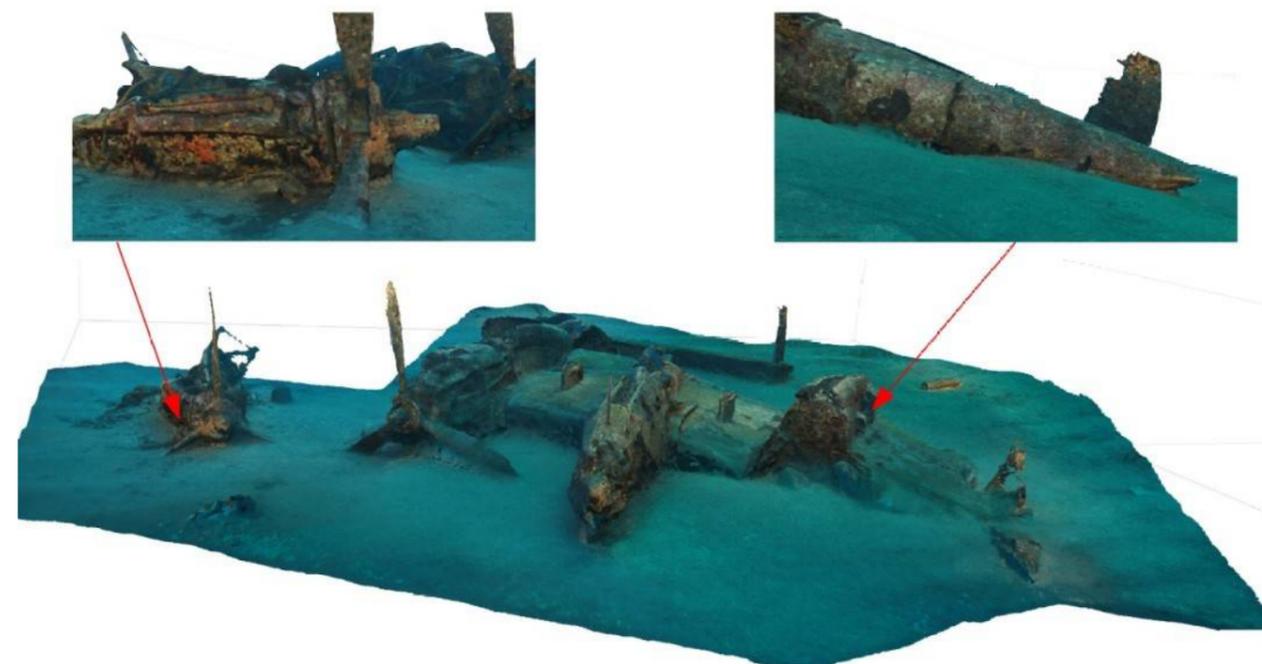
de vert). Se pose alors le problème de l'autonomie de cette source de lumière artificielle (que cela soit un flash externe ou un phare).

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.

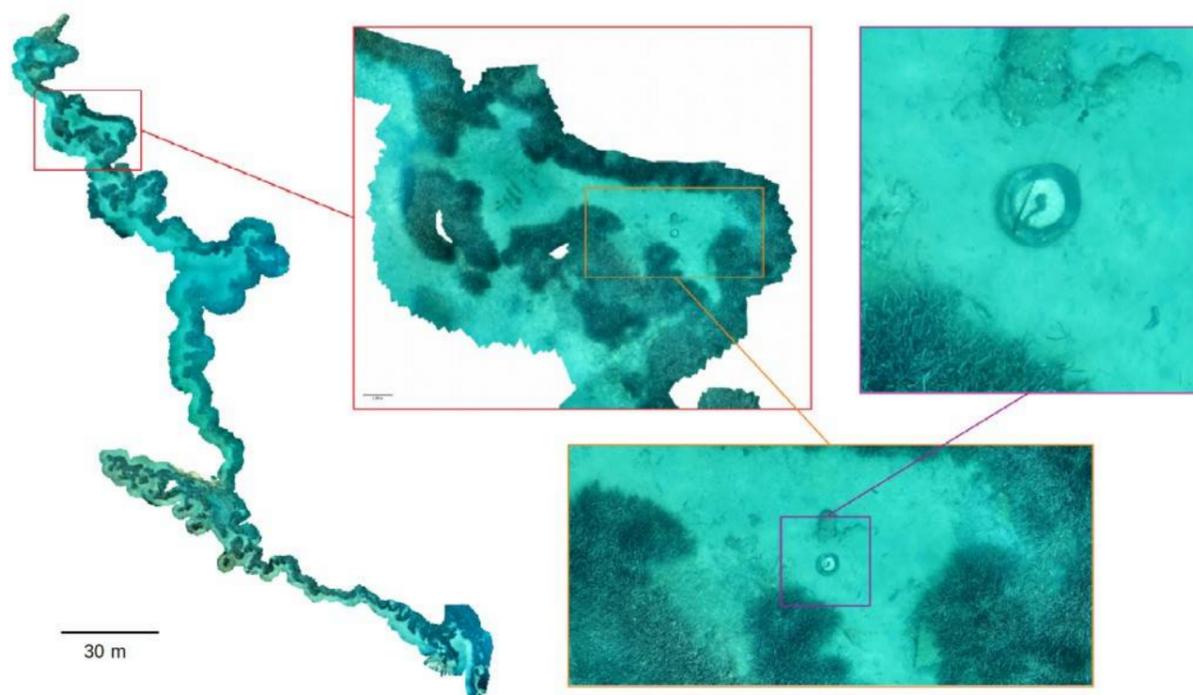


Représentation d'amphores d'un site sous-marin de fouilles archéologiques au large des côtes de Malte à environ 100 m de profondeur. Les photographies ont été réalisées avec un sous-marin Rémora 2000 de la COMEX. Source : projet GROPLAN (<http://www.lsis.org/groplan/>).

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.

certains 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 carrés. Si la prise d'un si grand nombre de photos est certainement possible, bien que complexe et coûteuse, 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 à 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.

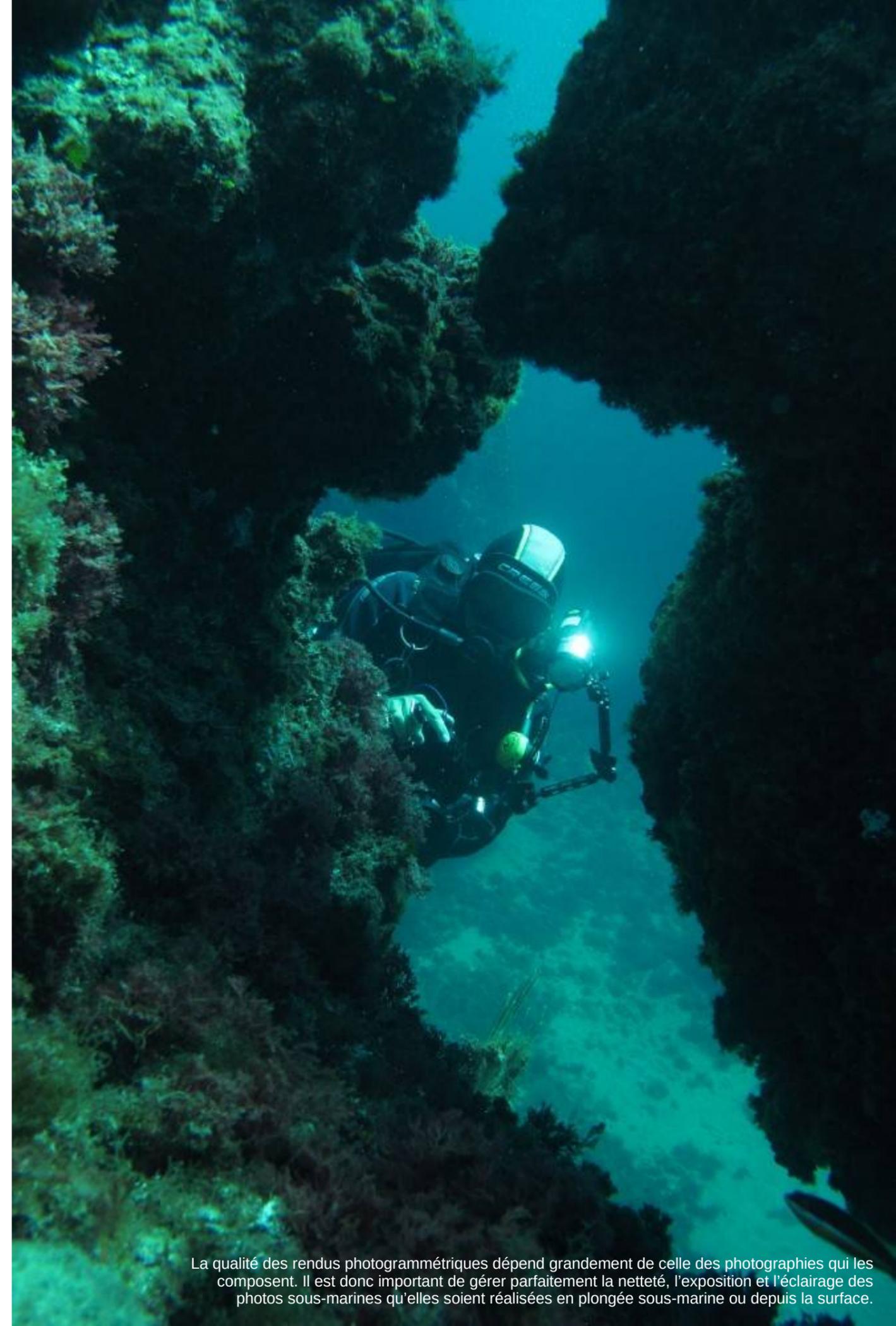
Pour en savoir (beaucoup) plus

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.

L'hypselodoris de Bullock (*Hypselodoris bullockii*) est un nudibranche commun de l'Indo-Pacifique (ici dans le détroit de Lembeh en Indonésie). Ne vous fiez pas à son apparent gigantisme sur cette photo, sa taille maximale est de 4 cm.

PORTRAITS SOUS-MARINS

Sébastien Ameeuw

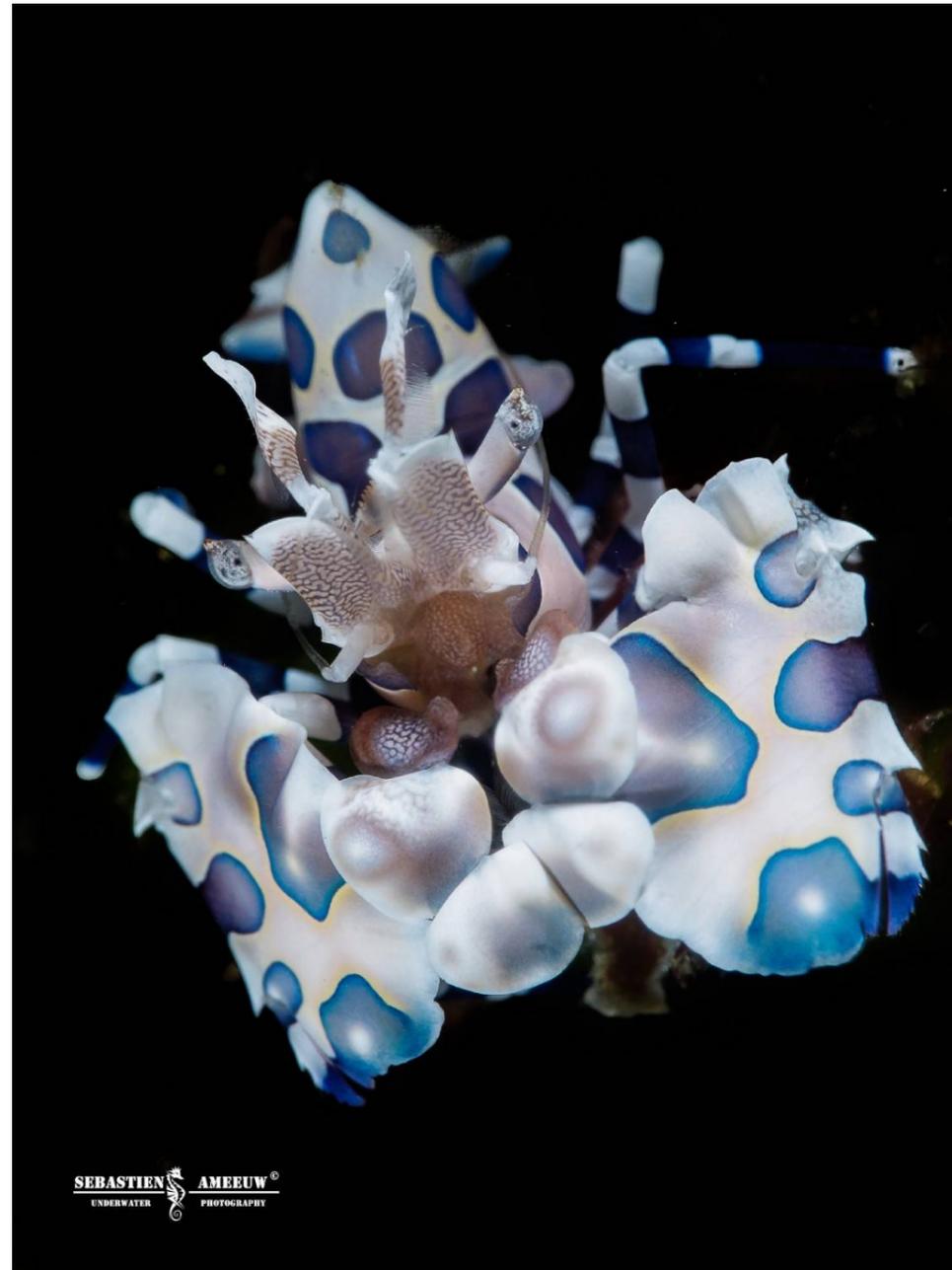
SEBASTIEN  **AMEEUW**®
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

Compétiteur hors pair doté d'un haut sens créatif et artistique, Sébastien Ameeuw nous fait pénétrer dans le monde enchanteur des habitants des fonds marins en nous livrant des portraits subaquatiques saisissants. Ne vous y trompez pas, l'ensemble des photos de ce portfolio tout en couleur et en subtilité est le fruit d'un travail d'équipe avec Delphine Fraysse, sa compagne en plongée comme dans la vie, qui joue à la fois le rôle de modèle, de binôme de sécurité, d'éclairagiste et de détecteur à petites bêtes sous-marines.

LE MICRO-PEUPLE DES FONDS MARINS



L'hippocampe pygmée rose (*Hippocampus bargibanti*) vit caché dans les gorgones. Sa petite taille (jusqu'à 2 cm) et son camouflage parfait le rend très difficile à repérer pour ses prédateurs... et aussi pour les plongeurs photographes. Anilao – Philippines.



Du haut de ses 5 cm, la crevette arlequin (*Hymenocera picta*) n'a pas peur de se nourrir d'espèce d'une taille beaucoup plus importante. L'un de ses mets favoris est la couronne d'épine (*Acanthaster planci*) qui décime les récifs coralliens. Lembeh – Indonésie.

Malgré les apparences, cette Flabelline à lignes rouges (*Coryphellina rubrolineata*) de Anilao (Philippines) ne se dore pas la pilule au soleil. Cette image est le fruit de l'assemblage de deux clichés. Anilao – Philippines.



MINI CRUSTACÉS

Comme vous le voyez il s'agit bien du nudibranche de la photo d'ouverture. Ce cachottier transporte sur son dos un passager peu commun : une crevette nettoyeuse impériale (*Zenopontonia rex*). Cette dernière amatrice de nourriture fine se nourrit de la matière fécale et du mucus de son hôte. Anilao – Philippines.

Le minuscule crabe boxeur (*Lybia tessellata*) porte bien son nom comme vous pouvez le voir. Il tient dans ses pinces de minuscules anémones afin de capturer ses proies ou de les agiter pour faire fuir d'éventuels prédateurs. Bali – Indonésie.





Ce minuscule bivalve vit sur les feuilles de posidonie (*Posidonia oceanica*) sur lesquelles il se déplace et se nourrit. Pour l'observer il faut mettre les mains dans les herbiers et s'armer de patience. La Ciotat – France.

PETITES BÊBÊTES DE MÉDITERRANÉE

La périclimènes améthyste (*Periclimenes amethysteus*) affectionne les anémones de Méditerranée pour y vivre et s'y nourrir. Cette association singulière permet à la crevette d'être protégée des prédateurs par les tentacules urticants de l'anémone desquelles elle est immunisée. La Ciotat – France.



L'hervia (*Cratena peregrina*) est un nudibranche commun de Méditerranée. Elle parvient à se nourrir des hydraïres sans déclencher leurs cellules urticantes. La Ciotat – France.



LE COIN DES POISSONS



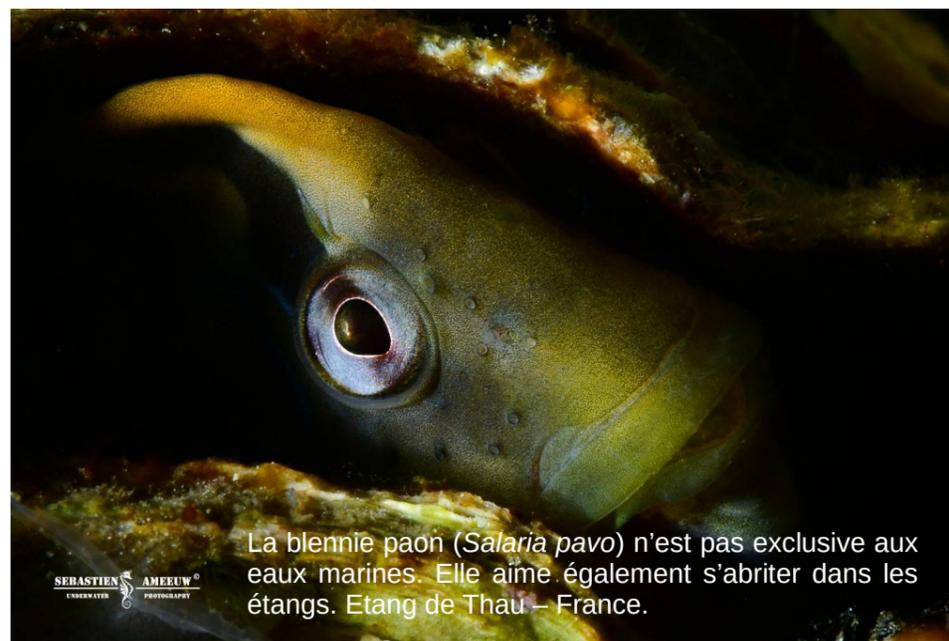
SEBASTIEN AMEEUW
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

Après une importante baisse de ses populations, le mérou brun (*Epinephelus marginatus*) est de retour grâce à un important effort de protection initié il y a plus de 25 ans. Port-Cros – France.

Chaque déchet sur le fond marin forme un abri pour ses habitants comme pour ce gobie pygmée jaune (*Lubricogobius exiguus*). Anilao – Philippines.



SEBASTIEN AMEEUW
UNDERWATER PHOTOGRAPHY



SEBASTIEN AMEEUW
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

La blennie paon (*Salaria pavo*) n'est pas exclusive aux eaux marines. Elle aime également s'abriter dans les étangs. Etang de Thau – France.



SEBASTIEN AMEEUW
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

La girelle paon (*Thalassoma pavo*) est une espèce originaire du sud de la Méditerranée. Le réchauffement de l'eau lui a permis d'élargir son aire de répartition au côtes françaises. La Ciotat – France.

Poisson-vache juvénile (*Lactoria fornasini*). Bali – Indonésie.



Poisson-papillon citron (*Chaetodon semilarvatus*). Mer Rouge – Egypte.



SEBASTIEN AMEEUW®
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

SEBASTIEN AMEEUW®
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

Holacanthé duc (*Pygoplites diacanthus*). Mer Rouge – Egypte.

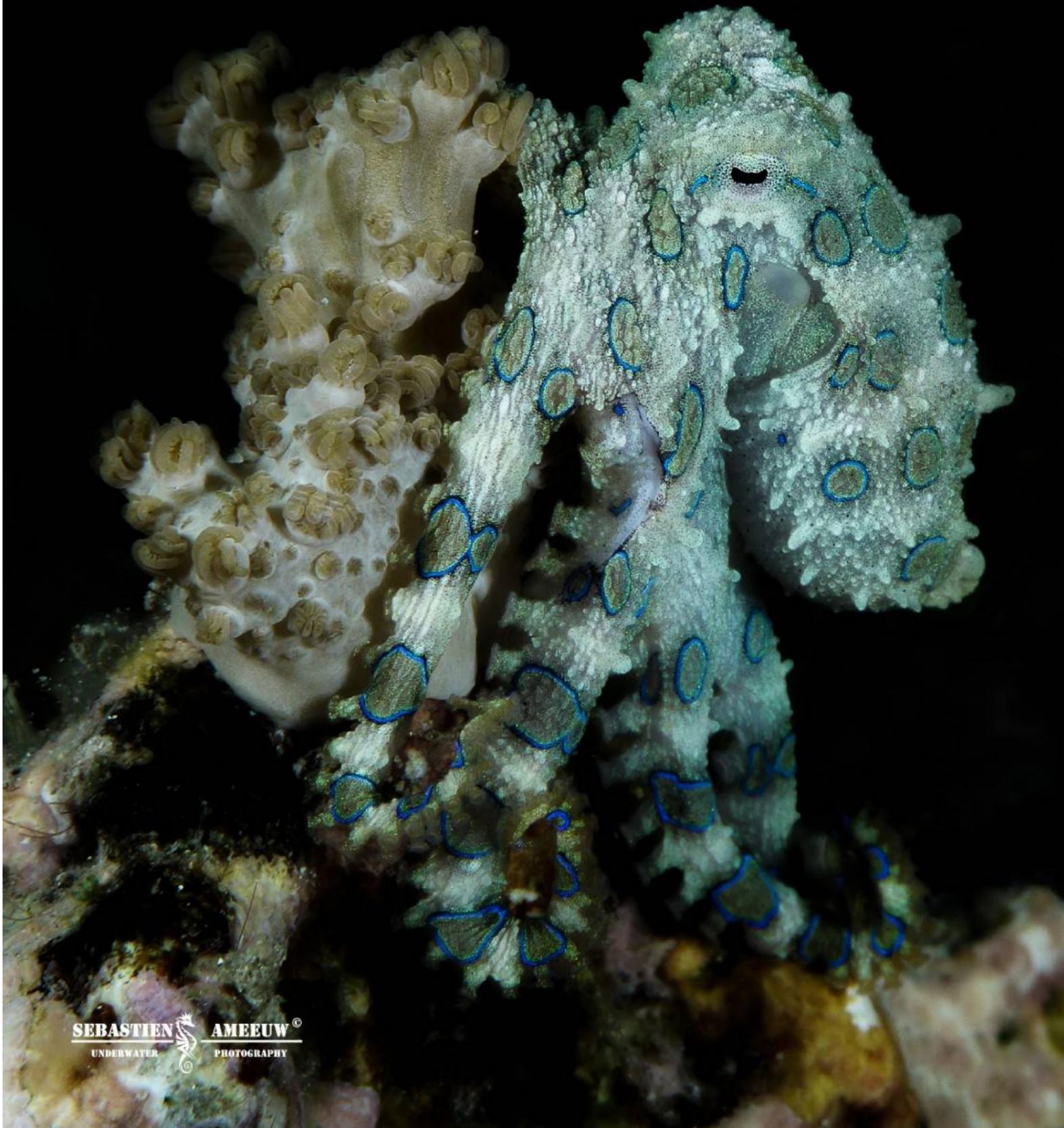


SEBASTIEN AMEEUW®
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

SEBASTIEN AMEEUW®
UNDERWATER PHOTOGRAPHY

Poisson-ange empereur juvénile (*Pomacanthus imperator*). Maldives.

Bien qu'une taille très limitée (entre 10 et 15 cm), le poulpe à anneaux bleus (*Hapalochlaena maculosa*) produit un venin capable de tuer un homme en cas de morsure.



Le poulpe commun (*Octopus vulgaris*) est très fréquent le long des côtes françaises de Méditerranée. Cependant, sa surpêche entraîne une baisse des populations et de la taille des individus qui sont capturés avant de devenir mature. La Ciotat – France.

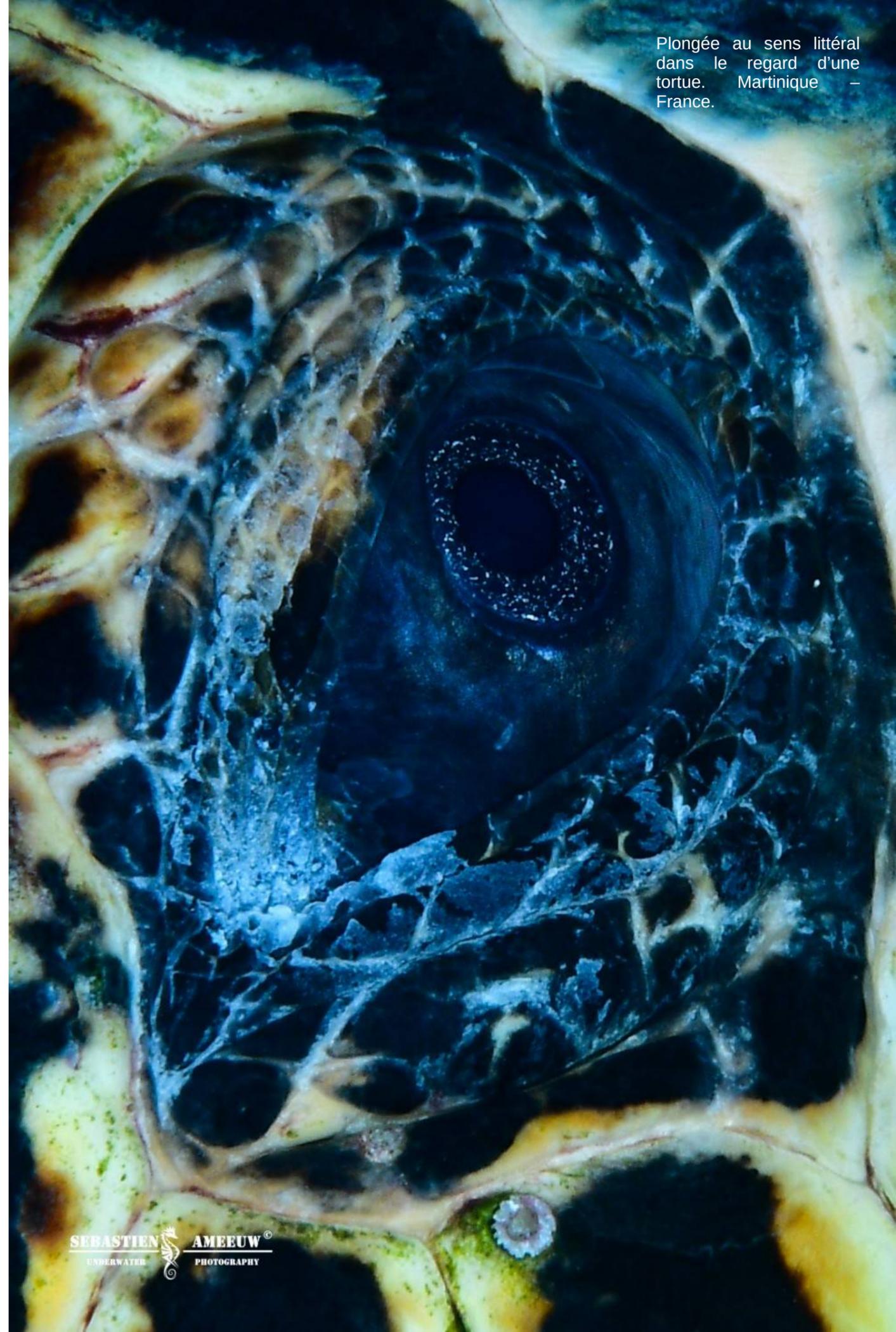


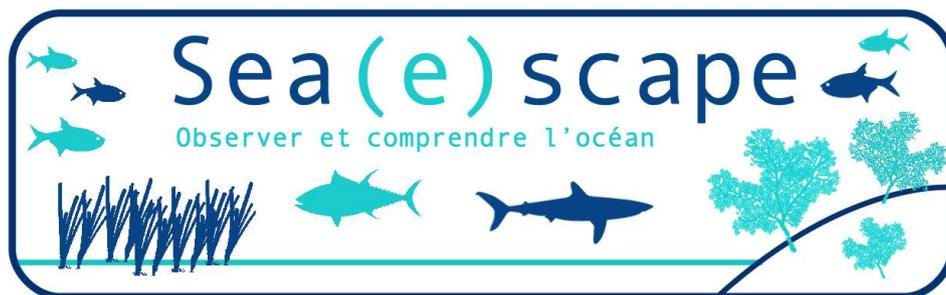
PIEUVRES
À L'APPUIE

Plongée au sens littéral
dans le regard d'une
tortue. Martinique –
France.

REGARD ANIMALIER

Cette tortue imbriquée (*Eretmochelys imbricata*) semble jauger le photographe. Madagascar.





www.seaescape.fr