



OCÉAN

UNE PLONGÉE

DANS L'INVISIBLE

1 MAGAZINE + 1 PORTAIL WEB POUR PARTAGER LES SAVOIRS
popsciences.universite-lyon.fr

EXPLORATIONS

Océan : les
nouveaux diplomates

CLIMAT

Dans la « peau »
de l'océan

SCIENCES ET TECHNIQUES

Les abysses cachent
un monde de lumière

BIOACOUSTIQUE

À la découverte des paysages
sonores marins

GÉOPOLITIQUE

L'épineux compromis du
partage des océans

ANTIQUITÉ

Les Étrusques, des marins
sans port d'attache ?



OCÉAN UNE PLONGÉE DANS L'INVISIBLE

1 MAGAZINE + 1 PORTAIL WEB POUR PARTAGER LES SAVOIRS
popsciences.universite-lyon.fr



Des articles
À LIRE



Des reportages
À REGARDER



Des interviews
À ÉCOUTER

ÉDITO

Les milieux marins, bien qu'ils soient encore peu explorés, subissent de plein fouet les contrecoups des activités humaines. Pollutions plastiques ou industrielles, réchauffement des eaux, fonte des glaces, acidification généralisée des mers... L'hasardeuse gestion des ressources terrestres et océaniques par les humains a mis en péril l'équilibre de l'océan, pilier du vivant.

Malgré cela, une lueur d'espoir s'est ravivée pendant la longue période de confinement que nos sociétés ont traversé entre mars et mai 2020. Le volume et l'intensité de nos activités a baissé de telle sorte que le vivant a rapidement repris ses marques là où on ne l'attendait plus. À Venise, en Méditerranée et sur une majeure partie de nos littoraux nous avons constaté – stupéfaits et rassurés – que le reste du monde vivant était doué d'une capacité de résilience plus importante que nous l'escomptions.

Du constat à l'action, la marche est grande et ce nouveau numéro de Pop'Sciences Mag contribue à rappeler que les milieux marins sont essentiels à notre subsistance. Partons du principe que (mieux) connaître les océans, c'est déjà (mieux) les protéger. De nombreuses équipes de recherche de l'Université de Lyon, bien que ni la ville de Lyon ni Saint-Etienne n'aient de façade maritime, étudient de nombreux phénomènes sous-marins : mécanique des fluides, chimie des océans, acoustique, microbiologie, géologie, archéologie sous-marine, droit international ... Autant de disciplines à l'affût de phénomènes parfois imperceptibles, mais primordiaux pour la compréhension et la préservation des fonds marins.

La part invisible de l'océan

Dans le creux des courants, à la surface et dans les profondeurs des mers, se cachent des sons, une faune, des édifices, des microparticules et des phénomènes chimiques presque insaisissables. C'est à cette part invisible et mystérieuse que l'Université de Lyon via Pop'Sciences Mag s'intéresse. Une exploration de l'univers océanique en saisissant son rôle crucial dans la régulation du climat, en traversant les frontières invisibles qui le morcelle, en observant les surprenants phénomènes de bioluminescence qui se produisent dans les abysses, en écoutant les complexes paysages sonores qui s'y dessinent et en partant à la recherche des ports perdus de l'Antiquité.

Allez au-delà de ce que vous pensez connaître de l'océan en étudiant ce qu'il nous cache le plus. Car, c'est dans l'imperceptible et l'inexploré des milieux marins que se dissimulent les raisons de croire à leur préservation.

Plongez dans l'invisible !

Stéphane Martinot

Administrateur provisoire de la COMUE Université de Lyon

Avec la participation des laboratoires de l'Université de Lyon suivants :

- La Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux (CNRS, Université Lumière Lyon 2, Université Claude Bernard Lyon 1, Université Jean Moulin Lyon 3, Université Jean-Monnet Saint-Etienne, ENS de Lyon, Aix Marseille Université)
- L'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1)
- Le Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, ENTPE)
- Le Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (CNRS, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA Lyon)
- L'Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon (CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1)
- Le Laboratoire de Géologie de Lyon Terre-Planète-Environnement (CNRS, ENS de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1)
- Le Centre de droit international (Université Jean Moulin-Lyon 3).

SOMMAIRE

04
EXPLORATIONS

Océan : LES
NOUVEAUX DIPLOMATES



12

CLIMAT

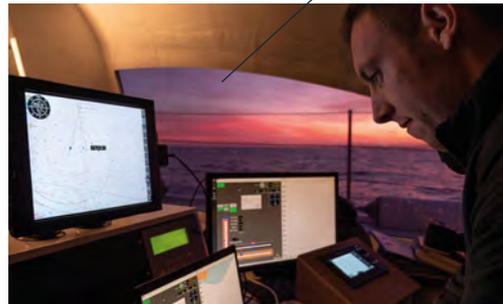
DANS LA « PEAU » DE L'OcéAN



28

BIOACOUSTIQUE

À LA DÉCOUVERTE DES PAYSAGES
SONORES MARINS



20

SCIENCES ET TECHNIQUES

LES ABYSSES CACHENT UN
MONDE DE LUMIÈRE



36

GÉOPOLITIQUE

L'ÉPINEUX COMPROMIS DU
PARTAGE DES OcéANS

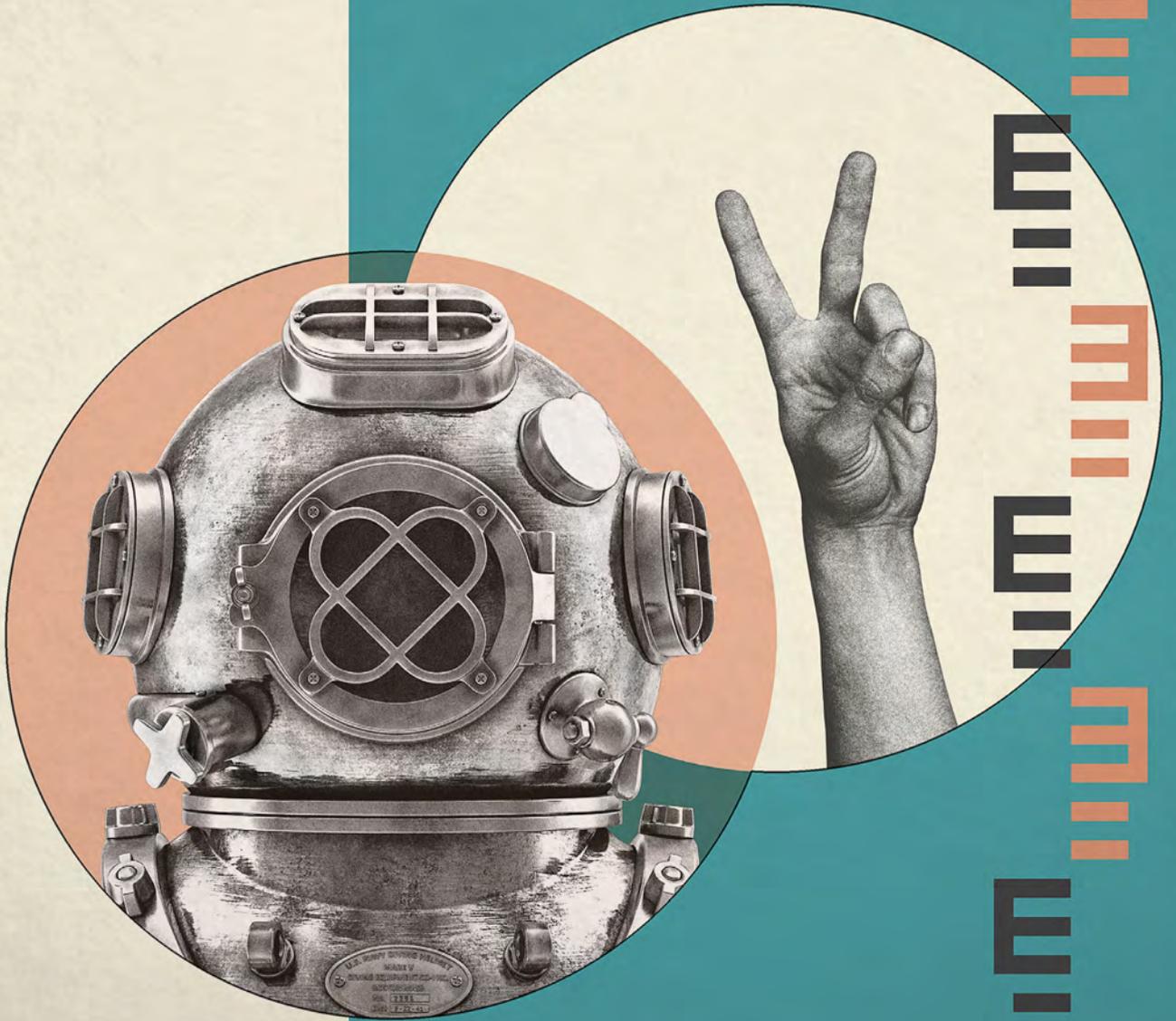


44

ANTIQUITÉ

LES ÉTRUSQUES,
DES MARINS SANS
PORT D'ATTACHE ?





04
EXPLORATIONS



OCÉAN : LES NOUVEAUX DIPLOMATES

Par Samuel Belaud

Qui peut imaginer raconter aux générations futures, qu'à l'aube de notre millénaire nous pouvions encore observer des cachalots en Méditerranée ? Que lorsque nous étions enfants, les îles Marshall n'étaient pas englouties par l'océan ? Ou que la faune marine n'a pas toujours eu l'habitude de se nourrir de plastique ? Nous n'échapperons à ce macabre récit, qu'en s'appuyant sur les épaules de celles et ceux qui, aujourd'hui, agissent concrètement et quotidiennement pour protéger les écosystèmes marins. Rencontre avec ces sentinelles qui nous offrent des raisons de changer nos comportements et de ne pas tomber dans la mélancolie d'un océan qui serait déjà perdu.



© Crédits Paul Cowell

ELIOT. L'ART DÉLICAT D'ÊTRE CACHALOT

PHYSETER MACROCEPHALUS.



© Crédits René Heuzey

Eliot est un jeune cachalot dont le comportement a bouleversé François Sarano, océanographe et fondateur de l'association Longitude 181¹, au large de l'Île Maurice en 2013. À la fois formidablement puissant et délicat, le carnassier s'avère être un fin explorateur qui fait preuve d'une curiosité inattendue face aux plongeurs qu'il croise. Par son comportement, Eliot nous amène à revisiter l'idée selon laquelle les humains seraient libérés de la nature et les seuls animaux politiques à habiter la Terre.

Inélegant et extraordinaire, Eliot est pour François Sarano² « une bête à la fois démesurée et unique. À elle seule, sa tête occupe un tiers de son corps ! ». Mais le colosse n'en dégage pas moins de quiétude et de délicatesse. Le récit que l'océanographe valentinois fait de ses rencontres avec lui est d'ailleurs ponctué de nombreuses expressions afférentes à l'élégance et la sensibilité. Il compare ainsi les mouvements d'Eliot à des « caresses » et décrit l'organisation sociale des cachalots comme « une solitude impossible. » La solidarité et la délicatesse semblent être les maîtres mots de la société des cachalots. « Au sein de leur clan, précise le passionné, ils font preuve de beaucoup de tendresse et d'attention envers leurs congénères. » Peut-être cette structuration sociétale basée sur l'affection résulte-t-elle de son caractère matriarcal et matrilineaire ...

Quoi qu'il en soit François Sarano est persuadé que pour mieux les comprendre et les connaître, il faut tirer sur la corde sensible qui est à la base des rapports entre cachalots. Entrer en relation avec eux implique pour les humains de devoir se resituer écologiquement, en adoptant une posture attentive et bienveillante pour les observer.

Changer de regard

Rien ne semblait pourtant moins évident que de réussir à faire monde commun avec eux. Avant le moratoire sur leur chasse (1980), les relations humains-cachalots ont été pour le moins tumultueuses. « Terrifiantes ! », insiste François Sarano, pour qui « nous avons fait aux cachalots ce que nous avons malheureusement fait avec bon nombre de nos colocataires, humains ou non, en les capturant et les massacrant dans un objectif de "conquête" et de domination de nos milieux environnants. »

Il ne faut remonter que soixante années en arrière pour retrouver l'époque où nous exterminions ces cétacés à tour de bras. Toutefois – et bien heureusement – la rancune ne semble pas être un sentiment qui se transmet entre les générations de cachalots. Ils n'expriment aujourd'hui pas de peur à notre égard et sont capables de venir au-devant des

1 > Ces rencontres se font dans le cadre du programme scientifique dirigé par l'association Longitude 181 sous l'égide de l'organisation mauricienne *Marine Megafauna Conservation* et en partenariat avec Label bleu production.

2 > François Sarano est docteur en océanographie, plongeur professionnel, fondateur de l'association Longitude 181, ancien directeur de recherche du programme *Deep Ocean Odyssey*, chef d'expédition et ancien conseiller scientifique du Commandant Cousteau.

humains à partir du moment où nous leur rendons l'attention, le respect et la passivité dont eux-mêmes font naturellement preuve.

Laisser le sauvage nous apprivoiser

Depuis sa première rencontre avec François Sarano, Eliot entretient une véritable relation qui pourrait s'apparenter à de l'apprivoisement. Car, si le scientifique tire beaucoup d'enseignements de ses rencontres avec l'animal, qui revient régulièrement à son contact, il est plus difficile de répondre au questionnement inverse : qu'ont les cachalots à apprendre des humains ?

« Je n'ai aucune idée de ce qu'Eliot tire de nos rencontres. En revanche, je peux affirmer qu'il les apprécie. Un animal sauvage qui reste pendant de longues minutes en notre présence et qui revient à notre contact, ne peut que trouver dans cette relation de l'apaisement et quelque chose qui satisfasse sa curiosité ». L'intimité et la familiarité de ces rencontres sont d'ailleurs tout à fait perceptibles pour le plongeur : « Les sons (clics) qu'il utilise avec nous, sont parfois les mêmes qu'il utilise avec ses congénères pour demander des caresses et du contact physique. » Bien que fondamentalement

différent, Eliot s'intéresse donc à l'altérité au point de sembler vouloir apprivoiser François Sarano « comme le renard apprivoise le Petit Prince. »

L'océanographe plaide pour réconcilier les humains avec le reste du monde vivant, en se resituant à leur niveau et non plus au centre. « Nous n'avons pas le monopole de la curiosité, insiste-t-il, je considère que chaque colocataire de notre Globe se situe au sommet de l'évolution. » D'ailleurs, la tranquillité anthropique liée au confinement généralisé est sans doute l'occasion pour le monde sauvage de démontrer la place qu'il est censé avoir. Avec la réappropriation des ports par toutes sortes de poissons, des lisières de nos villes par les cervidés et autres renards, des lacs et des aires naturelles par une quantité rarement observée d'oiseaux migrateurs ...

Ce sont « notre hégémonie et notre arrogance qui en prennent un coup » conclut François Sarano.

À REGARDER

Vidéo de Hugues Vitry :
« L'homme qui parle aux cachalots »

→ popsciences.universite-lyon.fr/le_mag/eliot-lart-delicat-detre-cachalot/



© Crédits Longitude 181

Eliot. Le tendre colosse est doté d'un formidable système sensitif, mais n'imaginons pas qu'il soit en mesure de percevoir le monde qui l'entoure à la manière des humains. Il capte en effet le milieu dans lequel il évolue par écholocalisation : pour communiquer, ressentir, et percevoir son environnement, le cachalot joue d'une gamme complexe d'émissions de sons : les clics, dont les séquences forment des codas. « Les clics qu'il émet lui permettent de communiquer et de se repérer dans les environnements froids, noirs et troubles des profondeurs maritimes », précise François Sarano.

POUR ALLER + LOIN :

« LE RETOUR DE MOBY DICK. Ou ce que les cachalots nous enseignent sur les océans et les Hommes » (F. SARANO) Ed. Actes Sud

LESLIE. LES VOILES GONFLÉES D'OPTIMISME

OCÉANOLOGUE ET NAVIGATRICE

Leslie Bissey est à la manœuvre de *Moody*, un honnête monocoque de 12,90 mètres, vaisseau ambassadeur de l'association *WeOcean*. À son bord, l'océanologue sillonne les mers à la recherche d'initiatives inspirantes pour un océan durablement préservé.



© Crédits Rémy Dubas

Bercée au rythme des vagues depuis ses premiers pas, Leslie Bissey se souvient avoir « *toujours eu en tête un rêve de bateau* ». Après une dizaine d'années d'expériences en océanologie, la navigatrice a vite repris son indépendance jusqu'à donner vie à son rêve d'enfance en achetant *Moody*, durant l'hiver 2017. Le voilier, fatigué par ses anciennes vies, est rénové avant que l'océanologue n'embarque la biologiste Elodie Gasparin pour une première campagne de sensibilisation et de rencontres en Méditerranée, pavillon battant *WeOcean*.

Depuis trois ans le binôme sillonne, caméra au poing, la mer intérieure. Elles embarquent celles et ceux qui réinventent un rapport au vivant et à la mer plus durable et respectueux. Le long métrage documentaire « Méditerranée à venir » relate cette aventure. « *Il dresse le portrait de sept porteurs d'initiatives que nous avons rencontrés : des pêcheurs, des scientifiques ou encore des militants engagés concrètement dans la protection de l'océan* ». Les deux exploratrices mettent également à profit leur bateau et leurs compétences scientifiques pour alimenter des plateformes de recherche participative. L'année dernière, elles profitent d'un besoin de l'association Aile-

rons pour repartir en mer, à la recherche des diables de Méditerranée : les raies *Mobula mobular*, cousines de la Manta.

Se laisser surprendre par la vitalité de l'océan

L'expérience marquera profondément Leslie Bissey qui décrit la rencontre avec ce gros poisson, difficile à observer, comme « *une apothéose de rencontre animale* ». D'autant plus que de nombreux cachalots, dauphins et autres rorquals communs sont également venus illuminer cette navigation. Une rencontre avec le sauvage que Leslie Bissey ne s'attendait pas à vivre avec autant d'intensité en Méditerranée. « *Après la Polynésie, j'imaginais la Méditerranée comme un peu fade. Pourtant cette mer est très sauvage et pleine de richesses.* »

Passionnée, la navigatrice met sa détermination au profit d'un objectif simple : démontrer que l'océan, bien que malmené et pollué par nos activités humaines, regorge de vitalité et d'actions bénéfiques pour assurer sa préservation.



OCEASCIENCES. SENTINELLES DES POLLUTIONS PLASTIQUES

ASSOCIATION DE JEUNES SCIENTIFIQUES

En 2019, une association de jeunes scientifiques a pris la mer pour une expédition à la voile baptisée ExploraGyre. Un aller-retour transatlantique de neuf mois au cours duquel le groupe d'étudiants a mené des opérations de sensibilisation et de recherches océanographiques sur l'impact de la pollution plastique sur les milieux marins.

L'aventure est née d'une passion commune pour la navigation et d'une volonté de s'engager contre la pollution des milieux aquatiques. *ExploraGyre* embarque un équipage d'étudiants volontaires, bien décidés à mobiliser leurs apprentissages scientifiques acquis dans les prestigieuses écoles du territoire (biologie à l'ENS de Lyon, électronique à l'INSA Lyon, informatique à Grenoble INP - Ensimag...), au service d'un projet qui « *allie le voyage à l'utile* », précise Cédric Jalade, Président de l'association OceaSciences et capitaine de l'expédition. Ils se sont lancés le 30 septembre 2019 depuis Concarneau (29), pour une campagne placée sous le signe de la recherche participative.

24% des poissons contaminés

Les quatre navigateurs ont pu mener de front des opérations de prélèvements d'échantillons aquatiques, d'étude biologique des poissons pêchés et de sensibilisation auprès des populations rencontrées au cours de leurs différentes escales. Les échantillons d'eaux de surface récoltés grâce à un filet « manta » ont été transmis au laboratoire de l'association de recherche participative *OceanEye*,

pour une analyse plus fine des composants et des corps étrangers. Quant à l'étude des poissons, le constat a été sans équivoque : « *sur une soixantaine de prises, 24% étaient contaminées par du plastique (...). Autant près des côtes qu'en pleine mer. Malheureusement cela confirme que cette pollution n'a pas de frontières* » constate amèrement le capitaine. Les navigateurs ont autant retrouvé du plastique dans les systèmes digestifs des prédateurs que dans ceux de plus petits poissons, confirmant par-là que la pollution aux micro-plastiques est bien répartie dans la chaîne trophique.

Pourtant, « *la puissance de ce milieu agit comme un aimant* », ponctue le président d'OceaSciences, mais pour combien de temps encore ? Si l'océan reste un environnement captivant et fabuleusement riche, il est également le déversoir des déchets et des restes de nos activités à terre. L'association est actuellement à la recherche d'un nouvel équipage pour reprendre le flambeau. Cédric précise que « *la réussite du projet tient à l'engagement total de tous les coéquipiers et à leur complémentarité.* » Avis aux étudiants passionnés et engagés, pour écrire le scénario d'une deuxième saison très attendue.

POUR ALLER + LOIN : oceasciences.wixsite.com



ALINE. LÀ OÙ VROMBIT L'OcéAN

DOCUMENTARISTE, COMPOSITRICE,
NAVIGATRICE.

© Crédits Gautier Dufau

Aline Pénitot passe son temps à révéler la puissance sonore des mers qu'elle explore. Dans ses créations, elle nous emmène loin du havre de silence auquel nous pourrions profanement nous attendre. Elle tend son hydrophone au fracas des vagues, au crissement des glaciers, ou encore au chant des baleines... et révèle des relations intimes entre la musique et l'océan.

La navigatrice a très tôt estimé comme essentielle la dimension sonore des mondes sauvages qu'elle parcourt. Mettre une oreille dans la mer, par le biais d'un micro, se révèle être une expérience sensorielle particulière qui permet de concevoir la réalité

des mondes sous-marins et de mieux comprendre ce qui s'y trame. Tous les microphones, mais pour elle, « *particulièrement les hydrophones révèlent des sons que l'oreille et le cerveau humain filtrent habituellement* » : les bulles d'air qui s'échappent, le crissement d'une plaque de glace, le cri d'un cétacé... Le silence n'existe pas au creux des courants, mis à part peut-être celui de l'ignorance. Aline Pénitot rappelle que « *nous avons moins cartographié la mer que la Lune.* »

« On ne sait que peu de choses des fonds marins et de ceux qui les habitent. C'est là, dans cette méconnaissance, que réside le seul silence de l'Océan. »

Aline Pénitot

Les harmonies sous-marines

Entourée de scientifiques, la compositrice raconte la musicalité sous-marine par le biais de séries documentaires. Ensemble, ils « *s'attachent à ce que la connaissance scientifique abreuve l'émotion esthétique et réciproquement* ». À titre d'illustration, elle travaille aux côtés d'une physicienne sur la mesure des ondes que génèrent les vagues au cours d'une tempête. Avec Nadia Sénéchal (Laboratoire EPOC, Université de Bordeaux), dans le fracas des lames océaniques, elles s'intéressent particulièrement aux caractéristiques de *l'onde infragravitaire*. Sorte de vague ultime qui résulte de la somme des longueurs d'ondes de toutes les autres vagues. « *Une poésie incroyable se dégage du travail scientifique sur les longueurs d'ondes*. Aline s'est même laissée surprendre par le « *langage parfois commun entre musique et mathématiques (...)* Quand une physicienne vous évoque "la libération des harmoniques", vous ne pouvez pas en tant que compositrice y rester insensible. »



À ÉCOUTER

« **Oublier Moby Dick** » : une série documentaire d'Aline Pénitot sur France Culture

→ franceculture.fr/emissions/lsd-la-serie-documentaire/oublier-moby-dick



© Crédits Bérengère Lopez Oros

La réponse de la baleine à bosse

Piéger 40 bioacousticiens sur ce qu'ils pensaient être un enregistrement de chant de baleine à bosse, pendant la conférence scientifique mondiale dédiée à ce cétacé, ça n'a pas de prix. Cette prouesse, Aline Pénitot a pu la mener grâce à une interface de dialogue humain/baleine qu'elle est en train de développer aux côtés d'Olivier Adam (CNRS – Sorbonne Université, Paris-Saclay). Elle a dans un premier temps découvert des relations sonores entre le chant de la baleine à bosse et le basson, de sorte que ni les bassonistes ni les scientifiques ne reconnaissent ce qui provient de l'instrument ou du géant des mers.

Mais les baleines se font-elles également avoir ? La documentariste détaille le fonctionnement de l'interface : « *D'abord, on enregistre leurs chants, pour ensuite les analyser. À l'issue d'un travail précis, à l'aide de l'interface, de reformulation (d'imitation) de la musicalité que ces mammifères produisent, nous diffusons et leur faisons entendre le produit de notre travail. Aujourd'hui, l'objectif est de signifier à la baleine que les humains tentent de les écouter et de développer un dialogue.* » Et le pari est gagné ! Aussi surprenant que cela puisse paraître : « *elles nous ont déjà – et à plusieurs reprises – répondu !* » C'est-à-dire qu'elles ont reproduit les sons que la documentariste leur a diffusés. Le dialogue qui s'est mis en place a d'ailleurs sidéré l'équipage du bateau : « *La sensation était telle que notre corps a lâché sous le poids de l'émotion* ».

La démarche musicale décuple la recherche scientifique ... et réciproquement. Là réside la réussite de l'échange inédit qu'Aline Pénitot et ses compagnons de bord ont pu brièvement mener avec les baleines à bosse et qui va être amplement prolongé.

En définitive, la musique et le son plus généralement, se révèlent être de formidables leviers pour réinventer nos relations avec les animaux sauvages.



12
CLIMAT

DANS LA «PEAU» DE L'OCÉAN

Par Benoît de La Fonchais avec Christian George, directeur de recherches en chimie à l'Institut de recherche sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IrcelLyon).

LE RÔLE MÉCONNU DE LA COUCHE SUPERFICIELLE OCÉANIQUE

C'est une fine pellicule de quelques micromètres qui recouvre une large fraction des mers. Grâce à sa composition particulière, elle contrôle une part importante des échanges entre l'océan et l'atmosphère. Et joue donc un rôle essentiel dans la grande machine climatique.

Imaginez-vous au large, couché sur le pont d'un voilier, entre ciel et mer. Au-dessus de vous, l'atmosphère, cette couche gazeuse qui enveloppe la Terre ; en dessous, l'océan, immense masse d'eau liquide qui recouvre les deux tiers de la planète ; et vous, entre les deux. Vertigineux, non ? Prolongeons cette rêverie métaphysique et laissons à présent notre regard glisser à la surface de l'eau. Vous êtes-vous demandé ce qui se passait précisément à la jonction des deux éléments, quand l'air et l'eau se rencontrent ? Et l'importance que cela pouvait avoir pour notre planète ? Ces questions sont le point de départ des travaux de Christian George, directeur de recherche en chimie à l'Institut de recherche sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IrcelLyon)¹. Le scientifique a notamment dirigé le projet *Air-Sea Exchanges driven by light* (échanges photo-induits à l'interface océan-atmosphère) qui s'intéresse

aux réactions photochimiques à l'interface de l'océan et de l'atmosphère.

L'océan, on le sait, joue un rôle essentiel dans la régulation du climat (*lire l'article suivant*). Il absorbe environ la moitié du rayonnement solaire arrivant sur notre planète et redistribue cette énergie au travers des courants océaniques. Depuis la dernière glaciation, il y a plus de 8 000 ans, cette circulation océanique est stable, et le couple océan-atmosphère contrôle le climat global de la planète. Avec le réchauffement climatique, cet équilibre est clairement menacé. Pour comprendre comment procèdent les changements globaux qui nous attendent, il est essentiel de s'intéresser, comme le fait Christian George depuis des années, aux interactions entre l'océan et l'atmosphère : échanges de chaleur, d'eau, de gaz et même de matière (pensez aux embruns marins qui se déposent sur votre peau quand vous restez un moment sur une plage). 

1 > CNRS – Université
Claude Bernard Lyon 1

› Une pellicule qui se forme quand la mer est d'huile

Et la chimie dans tout cela ? « Elle devient essentielle, assure Christian George, dès lors qu'on considère les processus ayant lieu à la surface des océans, et tout particulièrement sur une "mer d'huile" ». Savez-vous d'où vient cette expression populaire qui désigne une mer calme, sans vague ? Elle trouve ses racines dans la Grèce antique, époque où il était commun de verser de l'huile sur la mer. L'huile et l'eau ne pouvant se mélanger, l'huile restait en surface et créait un voile donnant ainsi aux riverains une impression bienfaisante de calme... « C'est en fait bien plus tard, au XVIII^e siècle, avec les travaux de Benjamin Franklin et de Lord Rayleigh, que l'on comprit le rôle et la nature des surfactants constitutifs des huiles », poursuit le scientifique. Benjamin Franklin démontra ainsi en 1773 qu'une simple goutte d'huile pouvait se répandre sur une grande surface (de l'ordre du kilomètre carré) et Lord Rayleigh révéla que cette couche organique pouvait être d'une finesse extrême (quelques micromètres). « Un surfactant, ou tensioactif, est une molécule possédant deux caractéristiques chimiques distinctes : l'une aimant l'eau et l'autre la détestant, explique le chercheur. Déversées sur une surface aqueuse, de telles molécules se répartissent de façon à mettre en contact chaque partie avec son milieu de préférence, créant ainsi une fine couche moléculaire à l'interface air-eau. »

Aujourd'hui, on sait qu'il n'est pas nécessaire de répandre de l'huile sur la mer pour obtenir une "mer d'huile". En effet, nous assure Christian George, « les océans sont parfois, voire fréquemment, recouverts d'une fine couche de surfactants produits par le cycle de vie d'une variété de micro-organismes marins ». Cette pellicule, communément appelée "couche superficielle océanique", constitue une



©crédits DR

« Les océans sont parfois, voire fréquemment, recouverts d'une fine couche de surfactants produits par le cycle de vie d'une variété de micro-organismes marins »

Christian George

Directeur de recherches en géochimie à l'Institut de recherche sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IrcelYon).

sorte de "peau". Elle présente une épaisseur variable de quelques dizaines de micromètres et possède des caractéristiques particulières qui la différencient nettement des eaux plus profondes : « Son analyse chimique révèle un enrichissement marqué en composés organiques issus du biote marin² comme des acides gras, aux propriétés tensioactives reconnues, des lipides ou lipopolysaccharides », précise le chercheur. Cette couche superficielle océanique recouvre une large fraction de l'océan : son étendue dépend de l'activité biologique marine mais aussi du vent. En effet, l'apparition de vagues a pour effet de mélanger cette couche avec les eaux plus profondes. Pour qu'elle s'installe, il faut que les vents soient inférieurs à 12-15 mètres par seconde.

2 > Ensemble des organismes vivants présents dans l'écosystème marin

Le siège de réactions chimiques complexes

Comment, malgré sa grande finesse, cette pellicule peut-elle contrôler une part importante des échanges entre les océans et l'atmosphère ? « *Le contrôle peut être soit physique en ralentissant l'évaporation de l'eau, soit chimique en empêchant un contact direct entre un gaz, l'eau de mer et l'ensemble des réactifs qu'elle contient* », explique Christian George. Prenons par exemple l'ozone, gaz composé de trois atomes d'oxygène (O₃), qui nous protège du rayonnement ultraviolet du Soleil dans la haute atmosphère et devient un polluant dans la basse atmosphère. « *La couche superficielle modifie la façon dont l'ozone réagit avec les ions bromure et iodure présents dans l'eau de mer*, poursuit le chercheur. *Cette propriété fait de la surface des océans un des principaux puits d'ozone à l'échelle planétaire.* »

« Quelques micromètres de matière organique à la surface des océans ont une influence globale sur l'environnement »

Christian George

Ce n'est pas tout. La nature de cette "peau" océanique lui confère aussi des propriétés chimiques largement insoupçonnées sous l'effet du rayonnement solaire. « *En absorbant l'énergie lumineuse, certaines molécules sont "excitées" et se retrouvent dans un état d'énergie supérieur qui induit une chimie dite photosensibilisée.* » Résultat ? La couche superficielle devient le siège de réactions photochimiques intenses en présence de vents faibles. « *Ces réactions conduisent à la transformation chimique des éléments en*

présence, mais aussi à la transformation de ceux tentant de traverser, dans un sens ou l'autre, cette couche superficielle. On aboutit ainsi à la formation de nombreux produits secondaires aux structures chimiques complexes. » Des réactions presque impensables dans les eaux diluées profondes.

Une chimie à l'origine des aérosols et des nuages

Résumons-nous : les échanges entre l'océan et l'atmosphère peuvent être régis par des processus chimiques ayant lieu sous l'action de la lumière dans une couche superficielle de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur qui *in fine* transforme les composés chimiques d'origine biologique avant leur émission dans l'atmosphère où une chimie différente opère. Que se passe-t-il ensuite ? À partir de là, ces molécules organiques vont subir d'autres cycles d'oxydation aboutissant à la formation de produits si peu volatils qu'ils contribueront à la formation de particules en suspension dans l'air : les aérosols. Ceux-ci vont pouvoir réfléchir vers l'espace une partie du rayonnement solaire, ou piéger une partie du rayonnement réémis par la Terre et accroître l'effet de serre. Mais ces aérosols pourront agir ensuite également comme noyaux de condensation pour la formation de nuages et ainsi affecter le climat. Avec plus d'aérosols jouant ce rôle, le nombre de gouttelettes formant les nuages sera accru, modifiant leur temps de vie, la fréquence des événements pluvieux. « *Finalement, ces quelques micromètres de matière organique à la surface des océans ont une influence globale sur l'environnement dans lequel nous vivons.* » Pensez-y la prochaine fois que vous contemplez une mer d'huile depuis le pont d'un voilier...

L'OCÉAN, GARANT DE L'ÉQUILIBRE CLIMATIQUE



Benoît de La Fonchais avec **Sylvain Pichat**, maître de conférences en géochimie, Laboratoire de géologie de Lyon Terre, Planètes, Environnement (LgL-TPE)¹ et chercheur invité au *Max Planck Institute for Chemistry, Paleoclimate Department* (Allemagne).

©crédits NASA

« *Qu'elle est bleue !* » Ce cri du cœur fut celui des astronautes d'Apollo 8, les premiers à quitter l'orbite terrestre, il y a cinquante ans, en voyant notre planète depuis l'espace. Ce bleu, qui caractérise si bien la Terre, est la marque de l'océan qui couvre 71% de la surface du globe. Avec une profondeur moyenne de 3 400 mètres, cette étendue représente un volume d'eau considérable ($1,4 \times 10^{21}$ litres). Par les échanges incessants de chaleur, d'eau et de gaz qu'il entretient avec l'atmosphère, l'océan joue un rôle déterminant dans la régulation du climat global. Comment fonctionne ce formidable "climatiseur" qui a permis à la vie de s'épanouir sur notre planète ?



©crédits DR

« **Par les échanges permanents de chaleur, d'eau et de gaz qu'il entretient avec l'atmosphère, l'océan joue un rôle déterminant dans la régulation du climat global** »

Sylvain Pichat

Maître de conférences en géochimie, Laboratoire de géologie de Lyon Terre, Planètes, Environnement (LgL-TPE) et chercheur invité au *Max Planck Institute for Chemistry, Paleoclimate Department* (Allemagne).

L'océan, réservoir de chaleur

L'océan absorbe l'essentiel du rayonnement solaire qu'il reçoit. En raison de sa masse, il constitue un énorme réservoir d'énergie thermique (on estime que sa capacité calorifique est environ 1 200 fois supérieure à celle de l'atmosphère). La température de surface de l'océan varie selon la latitude : d'une trentaine de degrés aux tropiques jusqu'au voisinage de 0°C aux pôles.

Ce stockage de chaleur s'effectue principalement dans les couches supérieures de l'océan. À partir de 200 mètres de profondeur, la température décroît rapidement. La température moyenne de l'océan s'établit ainsi autour de 2,3°C. Mais l'océan ne fait pas que stocker l'énergie thermique, il la redistribue de la zone intertropicale vers les hautes latitudes par le biais de la circulation océanique. C'est là qu'interviennent les courants océaniques.

La fonction régulatrice de la circulation océanique

La circulation générale océanique peut être subdivisée en deux composantes : la circulation superficielle et la circulation profonde, parfois appelée circulation thermohaline. La première est générée par les vents et la rotation terrestre (force de Coriolis) : ce sont les courants océaniques de surface, bien connus des navigateurs. Elle s'organise en grands tourbillons symétriques par rapport à l'équateur (*carte ci-contre*). Les tourbillons subtropicaux collectent les eaux réchauffées le long de leur parcours équatorial d'est en ouest. Ces eaux chaudes se concentrent dans les grands courants chauds et rapides des bords ouest des océans, tel le *Gulf Stream* dans l'Atlantique Nord. Ces courants se déploient ensuite en direction

des pôles en restituant leur chaleur à l'atmosphère. Il faut environ un an à l'eau pour parcourir ce circuit de surface.

Deuxième composante de la circulation océanique : la circulation profonde. Elle est parfois qualifiée de "thermohaline" parce qu'elle dépend, en partie, de la densité de l'eau, laquelle varie en fonction de sa température (*thermos* : chaud en grec) et de sa salinité (*halos* : sel). Plus une eau est froide et salée, plus sa densité s'accroît ; elle s'enfonce alors dans les profondeurs : les océanologues disent qu'elle "plonge".

Lorsque le *Gulf Stream* parvient dans l'Atlantique Nord, sa densité a augmenté par évaporation le long de son trajet et il se refroidit. Ses eaux se mélangent alors aux eaux polaires et plongent rapidement à de très grandes profondeurs (2 500 - 4 000 m). Elles progressent ensuite lentement (350 m/an en moyenne) en direction de l'Atlantique Sud où une partie des eaux remonte vers la surface (phénomène d'*upwelling*). L'autre partie se mélange avec les eaux profondes formées autour de l'Antarctique, en mers de Weddell et de Ross, grâce au refroidissement des eaux de surface. Cette branche de la circulation profonde circule autour de l'Antarctique et remonte vers le nord dans les différents océans. Ces eaux finissent par remonter vers les couches plus superficielles. Ce circuit s'effectue à une échelle de temps d'un peu plus d'un millénaire.

L'océan, un puits à carbone

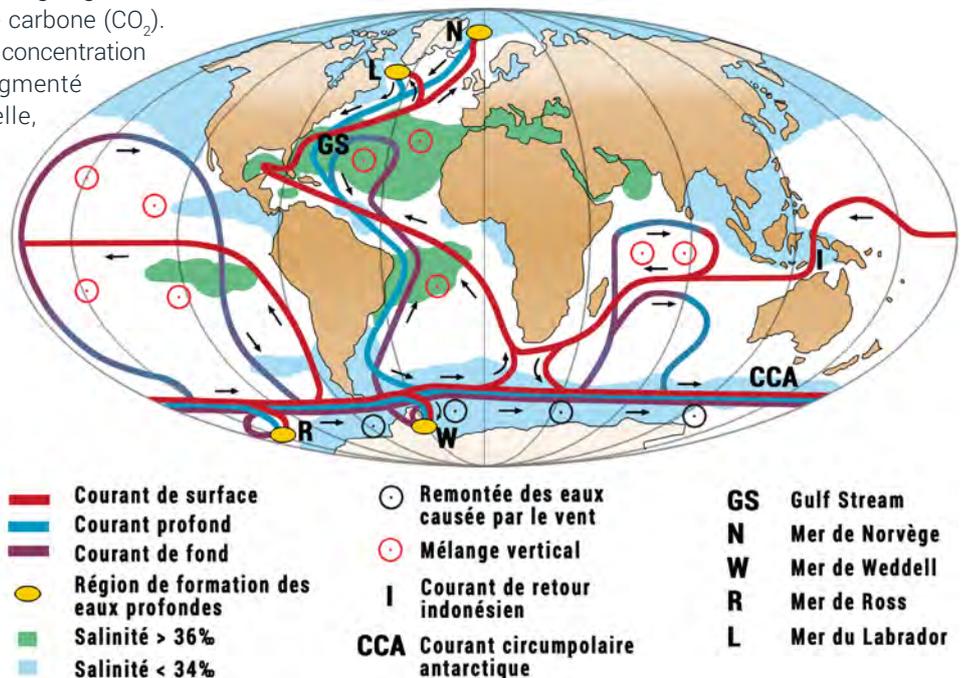
Intéressons-nous à présent aux échanges gazeux, et plus spécialement au dioxyde de carbone (CO₂). Nous savons tous aujourd'hui que sa concentration dans l'atmosphère a fortement augmenté depuis le début de l'ère industrielle, passant ainsi en deux siècles de 280 à 410 ppm. Le premier effet de

cette augmentation est une hausse de la température moyenne de la planète par accentuation de l'effet de serre. Le second est un déséquilibre du cycle global du carbone.

L'océan en effet est aussi un gigantesque réservoir de carbone, principalement sous forme d'ions bicarbonates (HCO₃⁻). Il en stocke 66 fois plus que l'atmosphère. Une partie de ce carbone est utilisée par le phytoplancton, qui vit dans les couches supérieures de l'océan, pour effectuer la photosynthèse. Ce phytoplancton est la base des chaînes alimentaires marines. Une fraction de la matière organique ainsi produite chute sous forme de particules vers les profondeurs. Une partie encore plus infime (< 1%) atteindra le fond de l'océan et sédimentera pour de très longues périodes. L'absorption du CO₂ atmosphérique est également soumise à des processus physico-chimiques. Le refroidissement des eaux de surface aux hautes latitudes augmente leur capacité à dissoudre le CO₂. Lorsque ces eaux plongent, en raison de leur densité, dans la circulation profonde, elles entraînent avec elles le CO₂ dans l'océan profond.

L'océan a absorbé environ 25% du CO₂ d'origine anthropique, la biosphère en captant 25%, le reste, 50%, s'accumulant dans l'atmosphère. Mais si la tendance se poursuit, le risque est de saturer le puits de carbone que représente l'océan et de provoquer des phénomènes en cascade sur l'ensemble du cycle du carbone planétaire et, ultimement, sur le climat global.

Source : Rahmstorf S. (2002) *Ocean circulation and climate during the past 120,000 years*. Nature 419, 207-214, 10.1038/nature01090.



Les effets du réchauffement climatique sur l'océan

› Par son rôle tampon, l'océan contribue à ralentir le dérèglement climatique. Il a absorbé ainsi le quart du CO₂ rejeté dans l'atmosphère par l'humain et plus de 90% de la chaleur induite par ce rejet. Mais à quel prix ? Réchauffement des eaux, acidification liée à l'absorption du CO₂ anthropique, désoxygénation, montée des eaux liée à l'expansion thermique et à la fonte des calottes et glaciers... avec des conséquences importantes pour les sociétés humaines et pour les écosystèmes, comme le souligne le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) dans son rapport spécial sur l'océan et la cryosphère (régions gelées de la planète) de 2019. « *La fonte des glaciers et des calottes polaires est désormais la première cause de l'élévation du niveau marin (+1,8 mm/an), devant l'expansion thermique des masses d'eau (+1,4 mm/an). Elle pourrait dépasser 1 mètre à la fin du siècle dans les pires scénarios* », avertit le groupe d'experts. Il déplore aussi les effets délétères des vagues de chaleur qui affectent les eaux de surface et de la baisse du pH (acidification) sur les écosystèmes marins, notamment les récifs coralliens tropicaux qui abritent le tiers des espèces marines connues. Il pointe enfin une diminution de l'oxygène et des nutriments dans les eaux de surface, qui se mélangent moins facilement avec les eaux plus profondes. Autant d'alertes qui devraient nous pousser à agir sans plus attendre.

12 SOLUTIONS QUE L'OcéAN NOUS OFFRE

POUR LUTTER CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

L'océan se trouve au cœur du système climatique de la planète (article précédent). Sa santé est donc cruciale non seulement pour les écosystèmes marins mais aussi pour la survie de toute l'humanité. Plus que jamais, nous devons le protéger. Mais nous pouvons aussi faire de l'océan le premier levier de lutte contre le réchauffement planétaire. C'est le message délivré par une équipe internationale de chercheurs en octobre 2018*. S'appuyant sur une vaste bibliographie, ils ont évalué le potentiel d'une douzaine de solutions, locales ou globales, que l'océan nous offre pour lutter contre le changement climatique.

Avertissement : toutes ne sont pas également réalistes, efficaces ou pertinentes (notamment les solutions génétiques ou de géo-ingénierie), mais elles représentent des pistes concrètes sur lesquelles gouvernements et populations doivent réfléchir ensemble.

* > *Ocean Solutions to Address Climate Change and Its Effects on Marine Ecosystems* - Frontiers in Marine Science - Volume 5 - 2018 - p. 337.

7. Préserver les ressources

Arrêter la pêche intensive et la surexploitation des réserves halieutiques.

Bibliographie

Un océan en bonne santé, un climat protégé, plaidoyer de la plateforme Océan & Climat.
The ocean as a solution to climate change, High Level Panel for a sustainable ocean economy.

POUR ALLER + LOIN :

popsciences.universite-lyon.fr/le_mag



À LIRE

Interview de Jean Jouzel :
« Repartir comme avant serait une hérésie »

→ popsciences.universite-lyon.fr/ressources/ocean-les-nouveaux-diplomates

12. Agir sur la génétique

Modifier les gènes des espèces marines pour qu'elles s'adaptent au réchauffement climatique.

11. Restaurer les écosystèmes dégradés

Revitaliser ou recréer des récifs coralliens, par exemple.

9. Augmenter le pouvoir réfléchissant des nuages

Pulvériser à grande échelle de l'eau de mer ou d'autres substances dans la basse atmosphère.

2. Préserver et restaurer la végétation côtière

La végétation littorale (mangrove, marais salants, herbiers marins...) contribue à l'absorption du CO_2 d'origine anthropique.

6. Surveiller l'hydrologie

Contrôler la qualité des eaux et des sédiments qui se déversent dans l'océan au niveau des grands bassins fluviaux.

10. Augmenter l'albedo de l'océan (le pouvoir réfléchissant de sa surface)

Tapisser la surface de l'océan d'une mousse non polluante pour réfléchir les rayons lumineux.

8. Protéger les habitats et les écosystèmes

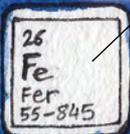
Créer des aires marines protégées pour préserver la biodiversité marine et les services rendus par les océans.

5. Lutter contre la pollution

Limiter les sources de pollution d'origines terrestre ou fluviale (eaux usées, plastiques...).

3. Fertiliser l'océan

Enrichir l'océan en éléments nutritifs (fer) pour développer le phytoplancton et augmenter ainsi sa capacité d'absorption en CO_2 .

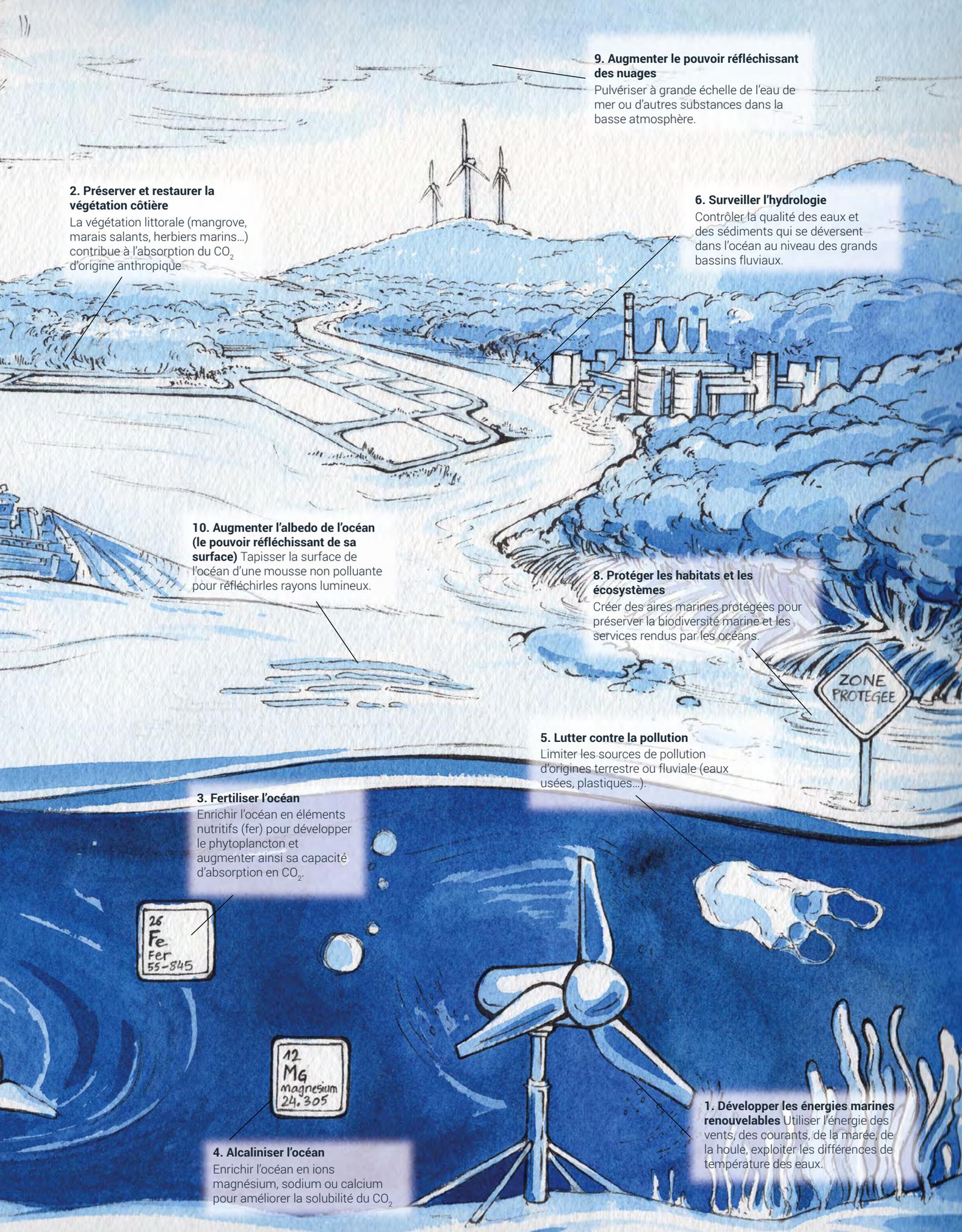


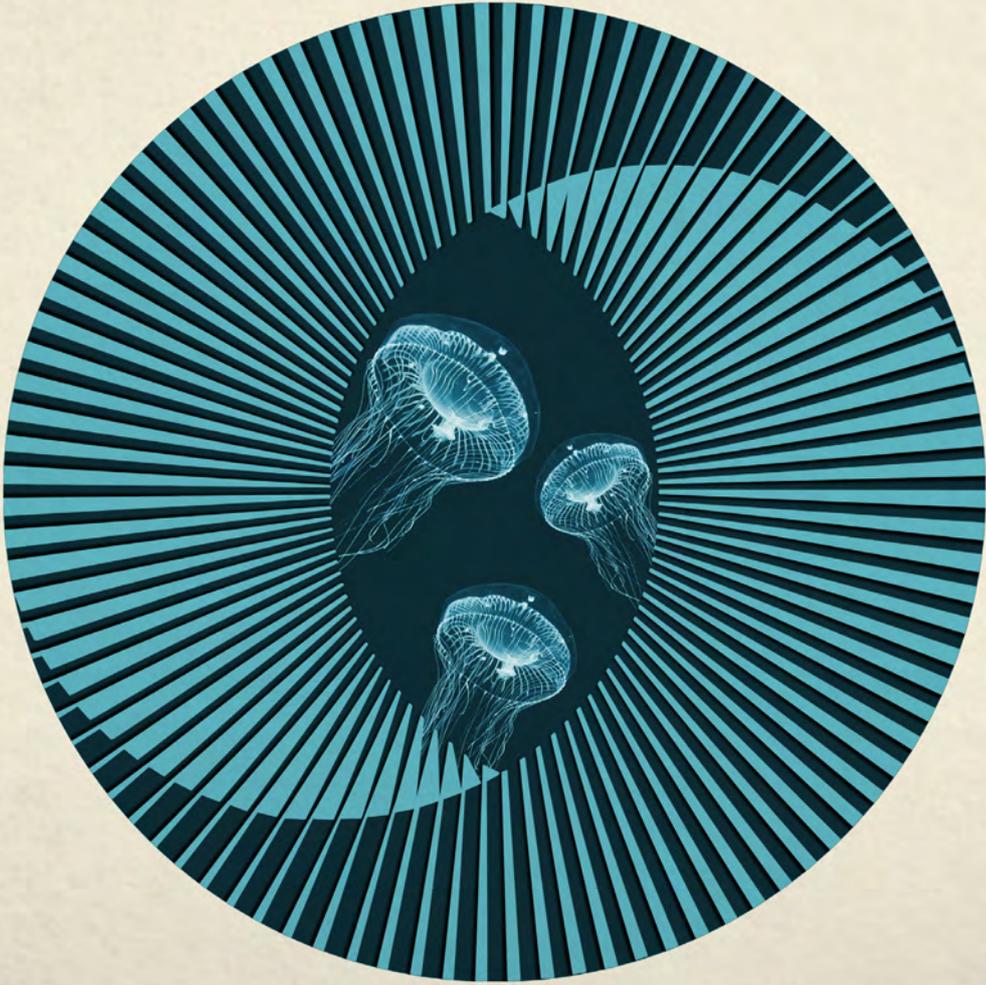
4. Alcaliniser l'océan

Enrichir l'océan en ions magnésium, sodium ou calcium pour améliorer la solubilité du CO_2 .

1. Développer les énergies marines renouvelables

Utiliser l'énergie des vents, des courants, de la marée, de la houle, exploiter les différences de température des eaux.





20
SCIENCES
ET TECHNIQUES

LES ABYSSES CACHENT UN MONDE DE LUMIÈRE

Par Caroline Depecker

Dans l'immensité océane, passé 100 mètres de profondeur, le froid et l'obscurité règnent en maîtres absolus. Les distances sont infinies. Comment communiquer dans ces conditions-là ? Le peuple des abysses, des créatures aux formes étranges défiant l'imaginaire, y parvient au moyen de la bioluminescence : pour se nourrir, repousser un prédateur ou se reproduire. Au large de Toulon, des chercheurs passionnés déploient dans les grands fonds des équipements sophistiqués afin d'observer comment les organismes qui y vivent entrent en relation les uns avec les autres.



Au sein du monde océanique, loin d'être une exception, la bioluminescence est une stratégie largement répandue, explique Séverine Martini, spécialiste de ce sujet à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie de Marseille (MIO). On a pu voir en effet qu'entre 100 et 4000 mètres de profondeur, près de 75% des espèces de pleine eau de plus d'un centimètre¹ émettent leur propre lumière ». Ce chiffre avoisine 40% s'il s'agit d'organismes vivant sur le fond marin². « La bioluminescence est vraisemblablement un moyen de communication très efficace ». L'océanologie dispose depuis peu d'un

nouvel outil de travail : une caméra très sensible à la bioluminescence. Celle-ci équipe "BathyBot", un robot benthique (adapté aux grandes profondeurs) qui, début d'année prochaine, explorera par 2500 mètres de fond les environs d'ORCA. Derrière cet acronyme se cache un important détecteur de neutrinos déployé depuis 2017 au large de Toulon par le Centre de physique des particules de Marseille et appartenant à [l'observatoire KM3Net](#). Biologie marine et physique des particules sont à priori deux champs disciplinaires disjoints. Pas dans le cas présent. 



À LIRE
→ P. 27

« KM3Net. Deux observatoires sous-marins ouverts sur les trois infinis. »

1 > Martini, S. and Haddock, S.H.D. *Quantification of bioluminescence from the surface to the deep sea demonstrates its predominance as an ecological trait*, Scientific Reports 7, 45750 (2017).

2 > Séverine Martini, Linda Kuhn, Jérôme Mallefet, Steven Haddock. *Distribution and quantification of bioluminescence as an ecological trait in the deep sea benthos*. Scientific Reports, Nature Publishing Group 2019, 9 (1)

› Entre particules cosmiques et organismes marins : une cacophonie lumineuse.

Produits un peu partout dans le cosmos, au sein notamment des étoiles comme notre Soleil, les neutrinos sont des particules presque insaisissables, car interagissant extrêmement peu avec la matière. Lorsqu'ils traversent notre planète, certains d'entre eux laissent pour trace de leur passage dans la mer un cône de lumière bleutée : c'est ce que cherchent à détecter les capteurs optiques d'ORCA. « Malheureusement pour les physiciens, la longueur d'onde de ce bleu, autour de 490 nm, correspond à la lumière émise par les organismes bioluminescents, commente la chercheuse du MIO. Un problème qui est apparu lors de la mise en route d'Antares », un détecteur voisin d'ORCA, et qui l'a précédé. Ce premier s'est révélé être, contre toute attente, un observatoire privilégié pour étudier la bioluminescence.

« L'hypothèse que la bioluminescence des grands fonds soit responsable de cette cacophonie de signaux a été posée et on m'a demandé d'imaginer une caméra pour observer ce qui se passait »

Rémi Barbier

Maître de conférence à l'Université Claude Bernard Lyon 1.



À REGARDER → P. 24

Photoreportage
Petite histoire de la
bioluminescence

Petit retour en arrière. 2008, Antares est pleinement opérationnel. Immergé par 2400 mètres de fond à 10 milles nautiques (18,5 km) au sud de l'île de Porquerolles, il possède 900 capteurs optiques sensibles au bleu, répartis sur 12 lignes de 400 mètres

de long. Le détecteur est relié par un câble électro-optique à l'institut Michel Pacha de la Seyne-sur-Mer, une station de biologie marine rattachée à l'Université de Lyon dès sa fondation en 1890 ; ses données transitent via l'institut jusqu'au Centre de Calcul de l'In2p3* à Villeurbanne, où elles sont stockées. « Les scientifiques exploitant les données d'Antares faisaient face à un bruit de fond trop élevé sur certaines périodes, les photomultiplicateurs chargés de reconstruire les cônes de lumière se déclenchaient en même temps, rendant les signaux alors difficiles à exploiter, raconte Rémi Barbier, maître de conférence à l'Université Claude Bernard Lyon 1. L'hypothèse que la bioluminescence des grands fonds soit responsable de cette cacophonie de signaux a été posée et on m'a demandé d'imaginer une caméra pour observer ce qui se passait. »

D'énigmatiques flashes lumineux.

Spécialiste des imageurs sensibles aux photons uniques, en poste alors à l'Institut de physique nucléaire de Lyon (IPNL, baptisé aujourd'hui Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon - Ip2I), Rémi Barbier s'inspire d'une technologie utilisée pour la vision nocturne et conçoit avec son équipe la caméra LuSEApher³: un prototype muni d'un capteur sensible à la longueur d'onde de 480 nm et capable de produire un cliché de chaque particule de lumière détectée. « Un signal de 10 photons bioluminescents suffisait à ce que cette caméra se déclenche automatiquement et enregistre une image », détaille le physicien. Une véritable performance technologique. Immergée sur Antares entre novembre 2010 et mars 2012, LuSEApher a enregistré plus d'une cinquantaine de films : pas de photo de méduse ou d'autre organisme posant patiemment devant l'objectif, mais... des halos de photons émis spontanément

* > In2p3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1)

³ > A. Dominjon, M. Ageron, R. Barbier, M. Billault, J. Brunner, et al.. An eBCMOS camera system for marine bioluminescence observation: The LuSEApher prototype. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 695, 172-178 (2012).



©crédits DR

« Entre 100 et 4000 mètres de profondeur, près de 75% des espèces de plein eau de plus d'un centimètre émettent leur propre lumière »

Séverine Martini

Océanographe à l'institut Méditerranéen d'Océanologie de Marseille.

et dont la source bouge très vite par rapport au courant. Certains adoptent parfois de brusques changements de direction, preuve qu'ils sont produits par autre chose que du plancton ! « *Ce travail nous a permis, outre de confirmer la présence de micro- et macroorganismes bioluminescents autour du détecteur, de déterminer la signature lumineuse de certains d'entre eux, c'est-à-dire la façon avec laquelle leur lumière décroît avec le temps, complète le chercheur. Un catalogue a ainsi été progressivement constitué.* »

Le bruit de fond lumineux d'Antares, calculé en kilohertz (kHz), a été riche d'autres enseignements. En 2009, puis en 2010, ce dernier, généralement compris entre 40 et 100 kHz, passe soudainement à 9000 kHz. Chaque pic de bioluminescence coïncide avec une augmentation de la température de l'eau et de la salinité sur le site. « *Cette croissance brutale de la lumière abyssale avait lieu au printemps. Nous en avons trouvé l'explication : le renouvellement des eaux profondes dans le*

golfe du Lion », note Séverine Martini⁴. Lors d'hivers particulièrement venteux et froids, le cas pour ces années-là, la température des eaux superficielles au large de Perpignan chute tandis que la salinité augmente du fait de l'évaporation. Résultat : ces masses d'eau deviennent plus lourdes que celles qui les soutiennent et coulent. Or, ces eaux superficielles sont riches en oxygène, carbone et divers nutriments. En s'enfonçant, elles apportent aux eaux profondes des ressources permettant à l'activité biologique de s'intensifier et, en premier lieu, aux plus petits organismes bioluminescents de proliférer : les bactéries.

Attirer ses prédateurs ... pour mieux subsister.

Prélevée à 2200 mètres de profondeur aux environs du détecteur, puis isolée, l'une de ces bactéries a fait l'objet d'investigations plus poussées par l'océanologue marseillaise. Son objectif : identifier comment les contraintes environnementales agissent sur le développement de la bactérie et plus particulièrement sur ses capacités à émettre de la lumière. Pour Vincent Grossi, géochimiste au Laboratoire de géologie de Lyon (LGL-TPE)** qui a participé à l'étude⁵, *Photobacterium phosphoreum* ANT-2200 est une bactérie parfaitement adaptée à son milieu et à la puissante pression de l'eau qui réside à 1000 mètres de profondeur, forte d'environ 10 mégapascals (MPa), soit cent fois la pression atmosphérique. « *Elle est aussi capable d'ajuster la composition chimique de sa membrane cellulaire afin de se développer sous des pressions encore plus élevées, comme celle du site d'Antares qui avoisine 20 MPa* », explique le spécialiste des microorganismes extrémophiles. « *De plus, l'étude a montré que sa bioluminescence croît avec la pression : elle est plus forte à 2200 mètres de profondeur qu'en surface.* » [📌 suite p.26](#)

4 > Tamburini C, Canals M, Durrieu de Madron X, Houpert L, Lefèvre D, et al. (2013) Deep-Sea Bioluminescence Blooms after Dense Water Formation at the Ocean Surface. PLoS ONE 8(7): e67523.

****** > CNRS, ENS de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1

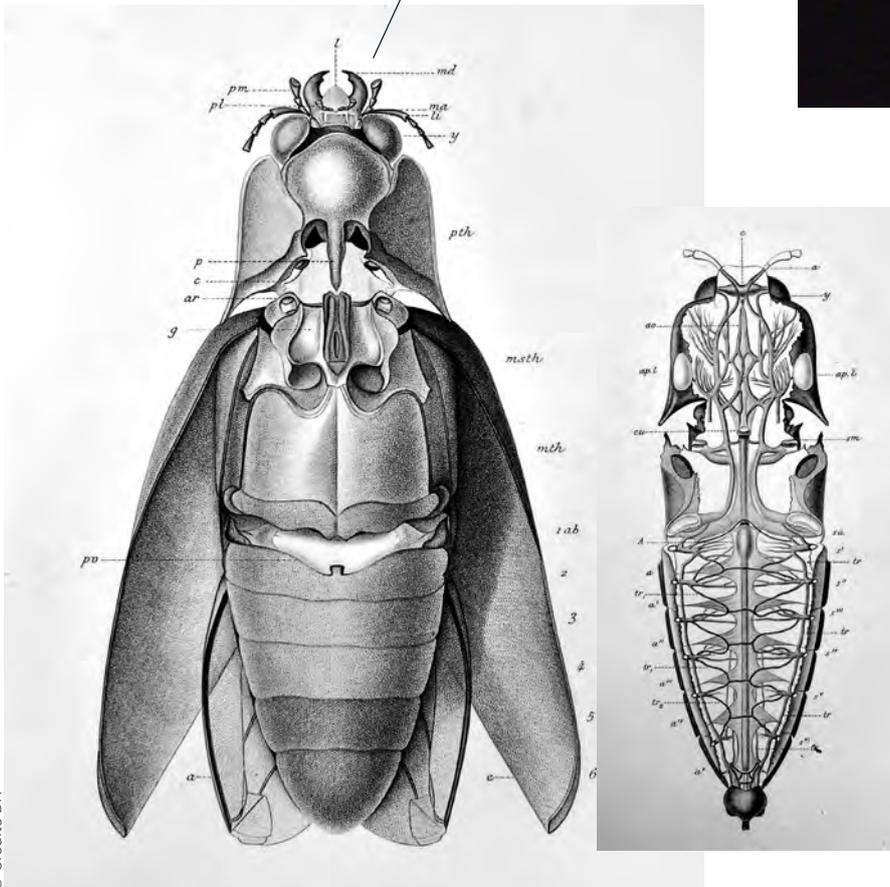
5 > Séverine Martini, Badr Al Ali, Marc Garel, David Nerini, Vincent Grossi, et al.. Effects of Hydrostatic Pressure on Growth and Luminescence of a Moderately-Piezophilic Luminous Bacteria *Photobacterium phosphoreum* ANT-2200. PLoS ONE, 2013, 8 (6), pp.e66580..

PETITE HISTOIRE DE LA BIOLUMINESCENCE

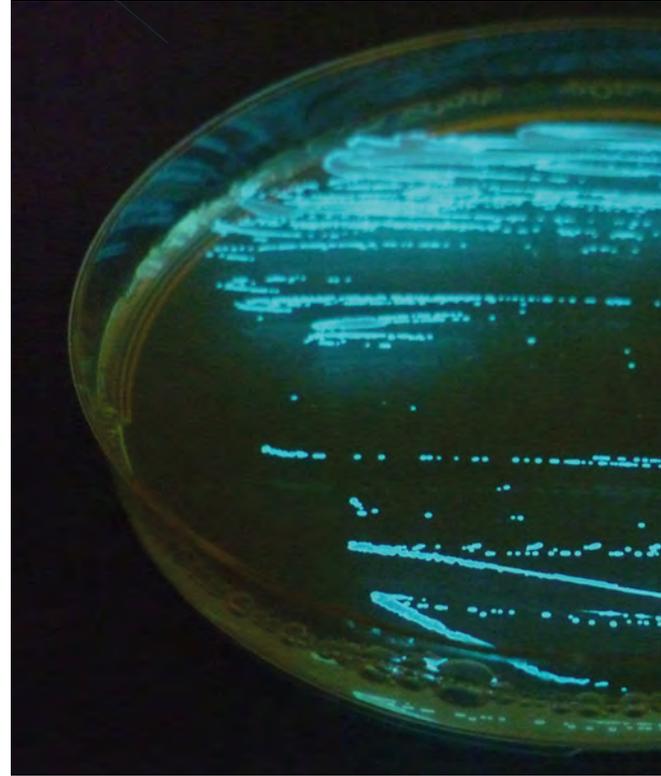
Les premiers témoignages de phénomènes bioluminescents remontent à l'Antiquité. Au XIX^e siècle, plusieurs scientifiques ont conduit des études expérimentales afin d'en découvrir le mécanisme intime. C'est à un professeur de l'Université de Lyon que l'on doit la clé de l'énigme : le physiologiste Raphaël Dubois (1849-1929). Au cours de ses travaux sur la « biophotogénèse ou production de la lumière par les êtres vivants », le chercheur démontre en effet, en 1887, que la bioluminescence est le résultat d'une réaction chimique entre deux substances : une enzyme, la "luciférase", et son substrat la "luciférine". La luciférase catalyse l'oxydation de la luciférine qui revient à son état initial en émettant des photons. Lucioles, vers luisants, crevettes, plancton... Tous peuvent émettre de la lumière mais une enzyme de méduse a peu de rapport avec celle d'un insecte : la réaction chimique aurait été réinventée une quarantaine de fois dans différentes branches de l'évolution. Sujet de laboratoire, la bioluminescence est observée aujourd'hui par les biologistes dans les abysses, grâce au recours de submersibles, et plus récemment, grâce au déploiement de nombreux observatoires sous-marins.

Elatérides lumineux, planche anatomique d'un Pyrophore des Antilles.

Sujet de thèse de Raphaël Dubois, les élatéridés lumineux sont des coléoptères dont l'étude a orienté les travaux du chercheur dans le domaine de la biophotogénèse. Ses résultats sont exposés dans les « Leçons de Physiologie générale et comparée » (1898) conservées à la bibliothèque universitaire de Lyon.



Photobacterium phosphoreum ANT-2200 vue dans le noir avec émission de bioluminescence. Évoluant librement en pleine eau ou présente dans les organes lumineux de certains poissons, les bactéries *Photobacterium phosphoreum* émettent une lumière bleu-vert semblable aux résidus solaires perceptibles dans les profondeurs où elles vivent. Les bactéries ne peuvent moduler leur émission lumineuse : le poisson en diminue l'intensité grâce à des cellules pigmentées noires.



Cnidaires

Siphonophores

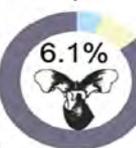


Hydroméduses



Mollusques

Ptérotopodes



Céphalopodes

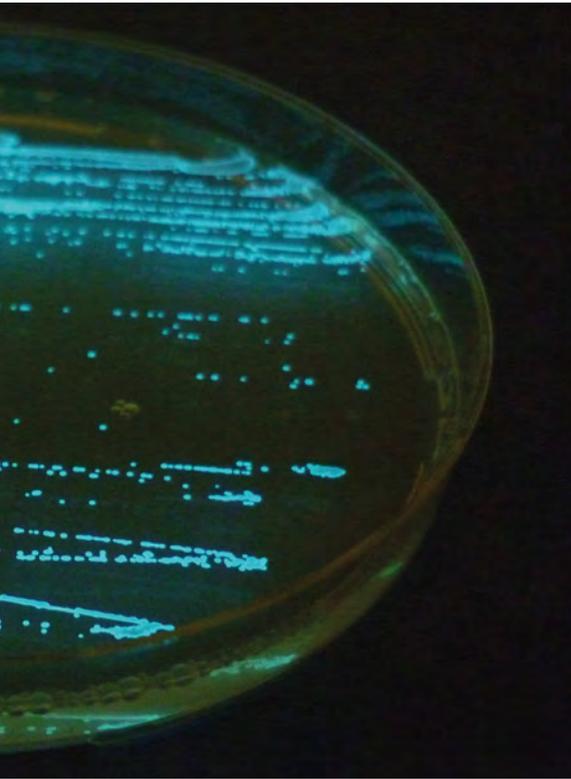


Poissons



Cténophores



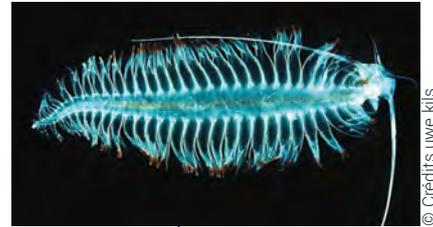


© Crédits Séverine Martini

Atolla Wyvillei ou méduse Atolla. Taille 15 cm. Profondeur : de 600 à 5.000 m. Lorsqu'elle est attaquée, cette espèce produit une série de flashes lumineux en cercles concentriques semblables à un stroboscope. Ce signal est un cri d'alarme visant à attirer un prédateur qui sera plus intéressé par l'attaquant que par elle. La biologiste Edith Widder a créé un appareil mimant les appels de détresse de la "méduse-alarme" pour appâter d'autres animaux des profondeurs. Avec succès : en 2012, de magnifiques images de calamar géant ont ainsi pu être filmées.



© Crédits NOAA Ocean Explorer



© Crédits Uwe Kils

Ver annélide Tomopteris. Taille : de quelques millimètres à 30 cm. Profondeur : de 0 à 4.000 m. Espèces pélagiques au corps gélatineux, ces vers polychètes n'en sont pas moins agiles grâce à leurs nombreux parapodes qui leur permettent de nager rapidement en pleine eau et d'y chasser toute sorte d'organismes vivants. Certains tomoptéridés ont un trait biologique rare : ils produisent un fluide lumineux de couleur jaune. À quoi cette lumière, imperceptible par les autres habitants des abysses, peut-elle servir ? C'est un mystère ...

Scyphozoaires



Quantification de la bioluminescence chez les animaux marins. La large proportion d'espèces animales capables d'émettre de la lumière, depuis la surface jusqu'en mer profonde, montre que la bioluminescence constitue un trait biologique essentiel pour le fonctionnement des écosystèmes.

Crustacés



Polychètes



Potentiel bioluminescent

- non bioluminescent
- peu probable
- indéterminé
- probable
- bioluminescent



© Crédits CNRS DT-INSU

Bathybot, le robot sous-marin.

Équipé d'une caméra ultrasensible et déployé en Méditerranée en 2021, le robot chenillé surveillera l'activité bioluminescente des grands fonds. Il filmiera entre autres la vie sur "Bathyreef", un récif artificiel dont la silhouette en forme de rampe, dentellée, a été conçue afin qu'un maximum d'espèces puissent la coloniser.

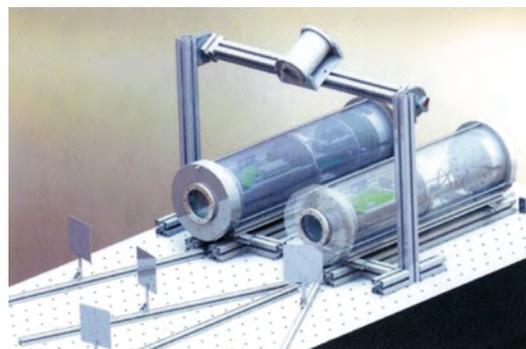
» Cette dernière observation est un indicateur quant à la fonction probable remplie par la bioluminescence chez ANT-2200 : en émettant de la lumière, les bactéries attirent plus facilement les prédateurs. « *Ce qui leur est avantageux, commente Séverine Martini. Elles trouvent au sein des poissons ou de tout autre organisme supérieur dans la chaîne alimentaire, des ressources nutritives et une température plus favorables à leur prolifération qu'en pleine eau* ». Rejetées dans les pelotes fécales, elles continuent à se développer au gré des courants pour être de nouveau consommées et dispersées par un autre prédateur. Ou bien, accrochées à la matière organique, finissent par tomber sur le plancher océanique et contribuent à la séquestration du carbone à l'échelle planétaire.

Depuis 2013, les pics lumineux sont rares: quand ils ont eu lieu, les mouvements de convection des eaux ne sont pas descendus aussi profondément, faute d'hivers assez rigoureux. Alors que la bioluminescence constitue un bon indicateur de l'activité biologique des grands fonds, l'impact possible du réchauffement climatique sur celle-ci se pose. D'autres interrogations restent aussi en suspens. Ces pics de bioluminescence sont-ils majoritairement dus à l'explosion de populations bactériennes sur le site d'observation ? Ou à l'arrivée d'organismes provenant de la surface et amenés par les masses d'eau ? Pour quelle part les macroorganismes, attirés par des ressources nutritives nouvelles, contribuent-ils à ce foisonnement de lumière ?

Constituer un catalogue d'images

« *C'est pour répondre à ces questions laissées en suspens que la caméra de BathyBot nous est utile* », reprend l'océanologue. Relié par un câble de 50 mètres à une boîte de jonction posée non loin des lignes d'ORCA, elle-même connectée à la terre, le robot est opérable depuis la surface. Il se verra assigner progressivement des trajectoires régulières, ainsi qu'une prise d'images automatisée. Celles-ci permettront de dresser un inventaire des espèces émettant de la lumière. Elles seront complétées par

d'autres prises de vues acquises par un système fixe de deux caméras en stéréo appelé "Biocam". Celui-ci a été développé par l'équipe de Rémi Barbier. Fruit du retour d'expérience de LuSEApher, la Biocam est capable de reconstruire des images tridimensionnelles des organismes observés afin d'en connaître la taille, lacune essentielle de LuSEApher. Elle ne peut se déclencher automatiquement en cas de bioluminescence, mais dispose d'un système d'éclairage à base de LEDs qui peut être modulé en fréquence et intensité. « *En jouant sur la longueur d'onde de l'éclairage et en lui imprimant des impulsions différentes, nous espérons attirer des espèces bioluminescentes dont nous enregistrerons la réponse à cette stimulation lumineuse* », précise le physicien.



© Crédits Rémi Barbier

La Biocam est capable de reconstruire des images tridimensionnelles des organismes observés.

À la clef de cette banque d'images acquises par BathyBot et par la Biocam, un espoir : celui d'identifier enfin les responsables des cinétiques lumineuses enregistrées par le passé. Séverine Martini tempère : « *Pour une signature donnée, il est peu probable que nous puissions lui associer une espèce particulière. Nous pourrions peut-être déterminer quel groupe d'organismes l'utilise. Il est plus vraisemblable, et ce sera un résultat très intéressant, que nous puissions lui attribuer une fonction précise.* » À savoir si elle est liée à la recherche d'un partenaire, à la fuite d'un prédateur ou à un comportement alimentaire.

Bien que trahi par ses flashes lumineux, le peuple des abysses demeure encore largement à l'abri de nos regards. Il gardera sans doute encore longtemps sa part de mystère. Imaginons-le protégé par le noir ambiant des profondeurs.



KM3NET : DEUX OBSERVATOIRES SOUS-MARINS OUVERTS SUR LES TROIS INFINIS

Installer un laboratoire, dans les profondeurs abyssales, doté d'équipements capables de détecter autant la matière cosmique que les organismes marins, relève de la prouesse scientifique. Les fonds méditerranéens sont le théâtre de cet exploit, accompli grâce à une large coopération européenne dans le cadre du projet KM3Net.

KM3Net, ou Kilometre Cube Neutrino Telescope, est un projet européen comprenant deux observatoires permettant de détecter la très faible lumière générée par les neutrinos, en cours d'installation en mer Méditerranée. Leur déploiement final est prévu pour 2026. L'un de ces télescopes sous-marins, baptisé ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss), arimé à 3450 mètres de profondeur, au large de la Sicile, est dédié à la recherche de neutrinos de grande énergie¹ provenant de cataclysmes de l'univers tels que des supernovas ou la formation et l'évolution de trous noirs. Il comprendra à terme 230 lignes longues de 700 mètres supportant au total 128 000 capteurs optiques.

ARCA sera jumelé avec un autre détecteur positionné au large de Toulon : ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss). Immergé à 2500 mètre de fond, celui-ci est optimisé pour traquer les neutrinos de basse énergie² en provenance du Soleil et de l'atmosphère terrestre. Son objectif : étudier certaines de leurs propriétés, comme leurs oscillations et leurs masses. Une fois achevé, ORCA totalisera 65 000 capteurs optiques répartis sur 115 lignes de détection. Le détecteur compte aujourd'hui six d'entre elles qui montrent un parfait état de fonctionnement.

« *Nous sommes contents et soulagés* », soufflait fin janvier Paschal Coyle, physicien au centre de physique des particules de Marseille (CPPM) et responsable scientifique d'ORCA. Le chercheur revenait alors d'une expédition en mer ayant permis d'ajouter deux nouvelles lignes au détecteur. « *Positionner des lignes avec une précision d'un mètre, à l'aide d'un robot téléguidé depuis la surface située 2500 mètres plus haut ; tout en sécurisant les connexions électriques lors du branchement des câbles, afin que le signal soit bon... C'est un vrai défi !* » Relevé avec succès. Cette étape réussie a conclu la phase de démonstration du détecteur, qui peut donc continuer à se développer.

Un laboratoire sentinelle, témoin de l'état de santé des fonds marins

Tout en ayant ses yeux braqués sur l'infiniment grand de l'espace, ORCA zoome sur l'infiniment petit des particules. Il explore aussi l'infiniment bleu de l'océan. En effet, depuis trois ans, dans le cadre du projet MEUST-NUMerEnv *, ORCA est progressivement équipé d'instruments connectés en temps réel, et mis au service d'études en sciences de la mer, de la terre et de l'environnement. Véritable plateforme d'expérimentations pluridisciplinaires, ORCA a été intégré au réseau d'observatoires sous-marins EMSO (*European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory*).

Les équipements ajoutés sont nombreux. Parmi eux, une ligne instrumentée autonome, baptisée ALBATROSS observe la colonne d'eau. Elle collecte différentes données : pression, température, conductivité, oxygène dissous, matières en suspension, courant. ORCA sera également doté de diverses sondes parmi lesquelles la Biocam, qui photographiera les espèces bioluminescentes. Par ailleurs, Bathy-Bot, un robot chenillé bardé de capteurs et de caméras, évoluera à 2400m de profondeur autour de Bathyreef, un récif artificiel déposé sur le fond et dont la forme a été imaginée afin d'y favoriser l'épanouissement de vie marine. Enfin, des hydrophones répartis sur les lignes du détecteur renseignent sur le déplacement de cétacés et autres mammifères marins à proximité.

« *Les observatoires câblés comme ORCA constituent des sentinelles précieuses car elles fournissent un suivi pluriannuel, continu et en temps réel, de l'état de l'océan*, commente Séverine Martini. *Elles nous permettent de détecter ses modifications écologiques potentielles, face au réchauffement climatique et aux autres pressions anthropiques* ». Et peut-être de les anticiper.

1 > Neutrinos dont la puissance énergétique est comprise entre 1 et 10 téraélectronvolt (TeV)

2 > Neutrinos dont la puissance énergétique est comprise entre 3 et 100 gigaélectronvolt

* > MEUST-NUMer Env est un projet porté par le CNRS, en partenariat avec Aix-Marseille Université (AMU) et l'université de Toulon (UTLN) et en concertation avec le Centre Européen des Technologies Sous-Marines de l'Ifremer. Son objectif est de développer une plateforme scientifique et technologique mutualisée entre sciences environnementales et astrophysique.

Bibliographie

Joussen I. « La défense lumineuse de l'ostracode ». Sciences et Avenir, le 1er janvier 2017

Fadel K. (2005) « La bioluminescence, une lumineuse invention de la nature ». Revue du Palais de la découverte n° 330, p. 36-44

Nouvian C. (2006). « Abysses », Fayards, p.85-101.



28

BIOACOUSTIQUE

À LA DÉCOUVERTE DES PAYSAGES SONORES MARINS

Par Ludovic Viévard

En une formule lapidaire, *Le monde du silence*, film du Commandant Cousteau de 1955, figeait nos imaginaires collectifs de l'Océan en un univers de quiétude liquide que nul bruit ne vient jamais troubler. La réalité est pourtant toute autre ! Dans l'eau, les sons se propagent, et vite. Notamment les basses fréquences émises par les grands cétacés qui peuvent traverser plusieurs milliers de kilomètres. À ces sons d'animaux s'ajoutent le bruit des activités marines humaines, brouhaha quasi-permanent, ainsi que les bruits naturels du vent ou de la pluie sur la surface de l'eau. Ensemble, ils forment les paysages acoustiques de l'Océan auxquels de plus en plus de chercheurs s'intéressent, car ils permettent de mieux comprendre et protéger les milieux marins.



Contrairement à ce qu'on pense souvent, le son se propage relativement bien dans l'eau», rappelle

Frédéric Sturm, maître de conférences à l'INSA Lyon et chercheur en acoustique sous-marine au LMFA¹. Dans l'air, le son parcourt environ 340 m/s alors qu'il peut en parcourir plus de 1500 dans l'eau, selon les conditions de pression, de salinité, ou de température... « *Mais la trajectoire des ondes n'y est pas nécessairement rectiligne* », précise-t-il. « *Montagnes, talus continentaux,*

bulles d'eau remontant de la croûte terrestre, etc., provoquent des phénomènes complexes de réflexion, réfraction et diffraction qui font que la propagation des ondes peut tourner en trois dimensions dans l'espace marin. » Conséquence ? Il est difficile d'en modéliser la trajectoire, ce qui ouvre un important champ de recherche en modélisation et simulation numérique puis d'expérimentations en cuve pour comprendre la propagation des ondes dans l'eau. ➔

1> Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (CNRS, École Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA Lyon)-



À ÉCOUTER

Sonothèque de Clément Cornec

→ clementcornec.com/sonotheque



› Mais si l'on a du mal à anticiper la trajectoire de ces ondes, notamment lorsqu'elles viennent de loin, on doit bien constater qu'elles sont nombreuses ! Selon leur origine, elles sont cataloguées en trois catégories de sons. La géophonie, de nature non-organique, comme **les vagues ou le craquement de la banquise**, tel qu'a pu l'enregistrer l'éthologue Clément Cornec. L'anthropophonie, provenant de l'activité humaine, toujours croissante en mer. Et la biophonie, regroupant les sons émis par les animaux marins : poissons, mammifères et invertébrés. Ils constituent les paysages acoustiques sous-marins, témoignages sonores de la diversité et de la richesse des milieux océaniques.

Identifier l'équilibre sonore des milieux marins

Le concept de paysage sonore marin est particulièrement fécond pour la connaissance des écosystèmes océaniques. C'est en particulier le champ d'étude de l'écoacoustique marine, « *une discipline émergente qui, depuis une dizaine d'années, étudie les sons qui circulent dans l'eau* », explique Lucia Di Iorio, éco-acousticienne à l'Institut de recherche Chorus². Grâce à des micros immergés, ou hydrophones, les chercheurs enregistrent les signaux sonores puis les interprètent. Qui les émet ? Quelles sont leurs significations ? Quelles sont les interactions entre les différents sons ? Que nous apprennent-ils sur l'océan et ses habitants ? Etc. Un vaste champ d'études qui repose sur l'intervention de disciplines variées telles que physique, mathématiques, informatique, ou biologie et écologie marine. À l'intérieur de l'écoacoustique, l'étude de la biophonie s'intéresse plus spécifiquement aux sons émis par les animaux marins qui trahissent en permanence leur activité.



© Crédits Peter Potrowl

« Inélégant, unique, monstrueux et génial. »

François Sarano

Docteur en océanographie, plongeur professionnel, fondateur de l'association Longitude 181, ancien directeur de recherche du programme *Deep Ocean Odyssey*, chef d'expédition et ancien conseiller scientifique du Commandant Cousteau.

Car, précise Lucia Di Iorio, « *si les poissons vocalisent, on entend aussi les crabes qui mangent ou les oursins qui marchent !* » Ces bruits, qui forment des « *communautés acoustiques* », sont de bons indicateurs de l'état des milieux ; plus les zones sont préservées, plus ces communautés sont riches. L'intérêt de ces techniques de suivi environnemental est leur caractère passif ; parce qu'elles se limitent à l'écoute, elles ne perturbent pas des milieux par ailleurs très difficiles à observer. Pour aller plus loin, Lucia Di Iorio pointe « *un des enjeux de la recherche qui est de parvenir à faire un lien entre diversité acoustique, c'est-à-dire les sons, et diversité taxinomique, c'est-à-dire les espèces. Or, sur les milliers d'espèces que compte la Méditerranée, on a décrit les vocalises d'une quarantaine seulement. On travaille à mieux les identifier mais aussi à comprendre les fonctions de ces vocalisations, qui vont de l'avertissement territorial à l'appel à la reproduction.* » Le croisement de données sonores permet de dresser des cartes de distribution

² Basé à Grenoble, l'institut Chorus est une association loi de 1901 spécialisée en acoustique passive et éco-acoustique. Elle est née en 2016 de la transformation de la chaire d'excellence du même nom, initialement hébergée au sein de la Fondation Partenariale Grenoble INP.

d'espèces ou de leurs activités ou d'un "état écoacoustique", à l'exemple du programme de surveillance CALME (voir encadré), particulièrement utiles pour les gestionnaires des milieux sensibles.

« Sur les milliers d'espèces que compte la Méditerranée, on a décrit les vocalises d'une quarantaine seulement »

Lucia Di Iorio

Éco-acousticienne à l'Institut de recherche Chorus.

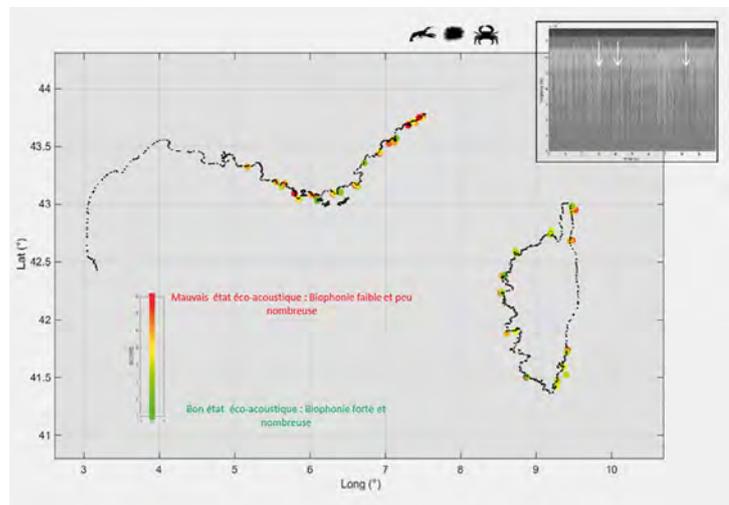
À l'écoute des grands mammifères marins

« Inélégant, unique, monstrueux et génial », tels sont les mots que l'océanographe François Sarano emploie à propos du cachalot Eliot (voir l'article page 6). Ces animaux fascinent mais restent peu connus, notamment parce qu'ils passent plus de 90% de leur temps sous l'eau, à des profondeurs pouvant dépasser les 1400 mètres, où ils chassent le calamar. Comme eux, baleines, dauphins, orques et tous nos autres étranges cousins marins, sont difficiles à observer. Grâce à l'acoustique passive, il est désormais possible de suivre leur comportement sans les gêner et de mieux décrire des organisations sociales souvent complexes. « *Celles des cachalots se structurent autour d'un clan très solidaire, matriarcal et matrilineaire, c'est-à-dire que tous les cachalots d'un clan ont une ancêtre commune*, précise François Sarano. *Pour les baleines, c'est tout différent, il n'y a pas de société. Chez les orques et les globicéphales, il y a une organisation très structurée, mais ce sont des sociétés patriarcales.* » ➔ [suite p.34](#)



CALME : MONITORER L'OcéAN

Pilotée par l'Institut Chorus qui le co-finance avec l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, CALME est un programme de suivi des herbiers de posidonie et des massifs de coralligènes (algues calcaires) de Méditerranée reposant sur plus d'une centaine de points d'écoute. Ce dispositif permet de suivre, par l'écoute, « l'évolution dans le temps de la qualité de ces milieux à travers des indices caractérisant l'abondance sonore, ainsi que la diversité et / ou l'intensité des sons émis », explique Lucia Di Iorio. Il contribue au recueil de mesures pour les directives européennes pour le milieu marin.



Carte d'index éco-acoustique.



© Crédits DR

« On travaille à mieux les identifier mais aussi à comprendre les fonctions de ces vocalisations, qui vont de l'avertissement territorial à l'appel à la reproduction »

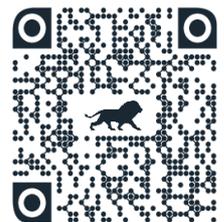
Lucia Di Iorio



À ÉCOUTER

« Les sons de l'océan »

➔ dosits.org/galleries/audio-gallery/



À LA RENCONTRE DES CACHALOTS

Placée sous la direction scientifique d'Hervé Glotin, professeur à l'Université de Toulon, la Mission Sphyrna Odyssey 2019 s'inscrit dans une série de campagnes initiées dès 2017. De septembre à décembre 2019, elle a parcouru plus de 2200 km entre Gène et les Baléares à la recherche des cachalots. Leurs clics sont repérés et enregistrés grâce à un dispositif d'écoute passive, ce qui renseigne les chercheurs sur leur comportement, et notamment leur cycle de vie.



Marion Poupard et Marina Oger (stagiaire) analysent et écoutent en temps réel les enregistrements réalisés par les Sphyrnas situés à plusieurs kilomètres du bateau.



Le Sphyrna 55 (17 mètres) et le Sphyrna 70 (21 mètres) sont les drones de surface utilisés pour cette mission. Conçus et développés par le bureau d'études navales Sea Proven, ils sont autonomes, silencieux, et embarquent plus d'une tonne de matériel, dont des hydrophones.



En janvier 2020, une semaine durant, de 1 à 7 cachalots ont été observés face à Toulon et au large de Nice. Des globicéphales ainsi que plusieurs espèces de dauphins ont également été vus et enregistrés.



© Pauline Cottaz

Marion Poupard et Pierrick Rouf (Ingénieur en systèmes embarqués) planifient les prochaines heures de navigation des Sphyrnas en fonction des canyons sous-marins rencontrés. Au premier plan, Hervé Glotin analyse les signaux enregistrés.



© Pauline Cottaz

Sphyrna embarque une carte son appelée Jason fabriquée par la plateforme SMIOT de l'Université de Toulon. Elle permet d'enregistrer 5 voies avec une fréquence d'échantillonnage très élevée (1 million de points par seconde, 5 x 1 MHz). Reliée à cinq hydrophones placés sous la coque, elle permet de trianguler le son pour en localiser l'origine. Les chercheurs savent donc quel animal émet quel clic (1 par seconde environ) et en déduisent la trajectoire de l'animal.

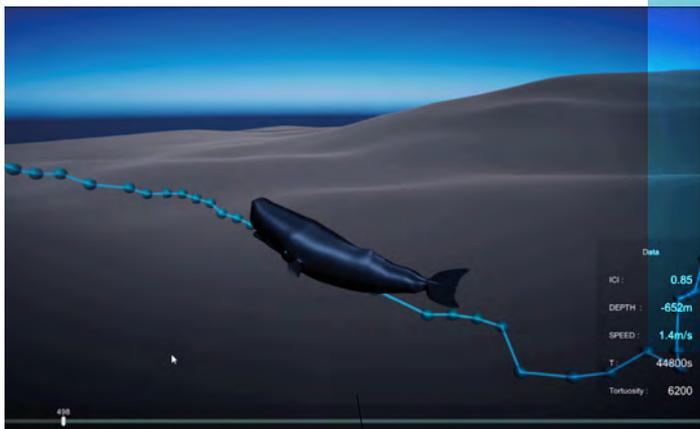


© Crédits Pauline Cottaz



© Crédits Pauline Cottaz

Les hydrophones sont des microphones conçus pour enregistrer sous l'eau. D'une très grande précision, ils sont placés sous la coque du Sphyrna et peuvent enregistrer des sons dans un rayon de 5 kilomètres autour du drone.



À partir des sons enregistrés, ici à plus de 3 km, les chercheurs peuvent retracer en 3D la plongée des animaux. Un cycle de plongée dure environ 50 minutes, sur environ 3 km horizontalement et à une profondeur moyenne de 500 m. Mais les cachalots peuvent descendre beaucoup plus profondément, et jusqu'à 1400 mètres.



© Crédits Pauline Cottaz

› Ironiquement, les mammifères marins utilisent, comme nous, l'acoustique passive pour accéder à leur environnement. Lucia Di Iorio rapporte que « *les baleines grises écoutent et repèrent les sons des crevettes calqueuses sur les côtes afin de choisir les sites les plus propices pour se nourrir.* » Ces animaux émettent également des ondes sonores pour communiquer. « *Le milieu marin est très atténuant et plus la fréquence d'une onde est basse, explique Frédéric Sturm, moins elle sera atténuée et portera loin, parfois sur des centaines, voire des milliers de kilomètres à très basses fréquences (de l'ordre du Hertz).* » Ainsi, les baleines utilisent-elles des gammes d'ondes allant de 12 Hz à 8 kHz pour des chants qui peuvent s'entendre à des milliers de kilomètres (voir page précédente). Les mammifères marins utilisent enfin un biosonar pour l'écholocation : lorsqu'une onde émise rencontre un obstacle, elle revient à l'émetteur, qui en obtient une "image". Ils peuvent ainsi "voir" des obstacles ou des proies à des profondeurs où règne pourtant une obscurité totale.

Le bruit, une terrible pollution invisible

Les bruits anthropiques représentent une réelle menace pour les animaux marins : ils réduisent leur espace de vie et peuvent les désorienter, voire les blesser. « *Certes, le son qu'émettent les grands mammifères est fort par rapport aux autres bruits biologiques, mais à cause du bruit de fond anthropique, il s'entend moins bien. Car ce qui compte, c'est le rapport "signal à bruit", c'est-à-dire le rapport entre le son de l'animal relativement aux bruits anthropiques ambiants. Plus le rapport est faible, moins le son*



« (...) si grâce à la bioacoustique, on arrive à prouver qu'il y a des hot spot de biodiversité, où vivent des cachalots, alors on aura plus de poids pour mettre en place des mesures particulières de régulation ou de limitation du trafic maritime dans ces zones. »

Marion Poupard, Thèse de doctorat à l'Université de Toulon, CNRS, Laboratoire LSIS, équipe DYNI.

est audible de loin. Or, témoigne Lucia Di Iorio, le bruit de fond a augmenté considérablement ces dernières décennies. » De fait, il y a un nombre croissant de sources sonores : augmentation du fret maritime, prospection pétrolière et forage off-shore, battage de pieux pour l'installation de champs d'éoliennes, sans compter l'augmentation des bruits côtiers, particulièrement en période estivale qui est aussi « *celle où beaucoup d'animaux chantent pour la reproduction.* » Autant de raisons qui ont conduit, en 2010, la France à inscrire le bruit dans le Code de l'environnement (article L219-8), comme pollution sonore sous-marine.

L'abaissement du volume anthropophonique peut passer par des solutions techniques, souvent onéreuses, ou par la transformation de nos modes de vie, complexe et lente.

Aujourd'hui, ce sont d'abord des mesures palliatives qui voient le jour, comme des radars et bouées anticollisions qui enregistrent et détectent en temps réel les grands mammifères pour prévenir les bateaux. Autre perspective, des zones protégées définies à partir des données de recherche. « *Ainsi, insiste Marion Poupard, en face de Toulon, il y a des activités militaires et un fort trafic de ferries. Mais, si grâce à la bioacoustique, on arrive à prouver qu'il y a des hot spot de biodiversité, où vivent des cachalots, alors on aura plus de poids pour mettre en place des mesures particulières de régulation ou de limitation du trafic maritime dans ces zones.* » La bioacoustique révèle que les paysages sonores marins sont un pilier de l'équilibre écologique des océans et nous invite à promptement les préserver de nos nuisances anthropophoniques.



LES CACHALOTS ONT-ILS UN ACCENT ?

Les grands mammifères sont des animaux sociaux. Pour interagir, les individus émettent des sons, ou des vocalises, de formes différentes. Celles des baleines s'apparentent à un "chant". Quant aux dauphins et aux cachalots, ils s'expriment par clics, des sons brefs dont l'enchaînement forme des codas. Pour François Sarano, « *il ne s'agit pas d'un langage comme nous l'entendons. Les émissions sonores très structurées transmettent bien des informations et des émotions, comme la musique, mais il ne faut pas essayer de les traduire en mot et en phrases.* » Étonnamment, ces vocalises évoluent dans le temps et selon les groupes d'animaux. Les chercheurs ont ainsi remarqué que la fréquence moyenne des vocalises des baleines bleues avait tendance à diminuer depuis les années 1960. Plus surprenant, les vocalises d'une même espèce comportent des dialectes, différents selon les endroits et les clans d'animaux. Marion Poupard, doctorante au LSIS³ à Toulon et au LEHNA⁴ à Lyon, explique ainsi que « *certains types de vocalises correspondent à un groupe en particulier. Si on parvient aujourd'hui à relier un type de vocalises à un groupe d'orques, ce qu'on ne sait pas encore faire, c'est différencier les animaux dans le groupe et mieux comprendre la communication intra-groupe.* » Mode de communication en évolution, structure sociale complexe... des spécificités qui dessinent la possibilité de cultures propres à certains mammifères marins. Or, la culture repose sur la transmission, ce qui confère aux individus, et notamment aux plus âgés, une fonction d'enseignement. L'existence d'une culture et donc de particularités apparaît ainsi comme une donnée particulièrement importante pour la préservation des espèces.

Bibliographie

La bioacoustique des cachalots, reportage vidéo du CNRS, CNRS Images, 2019

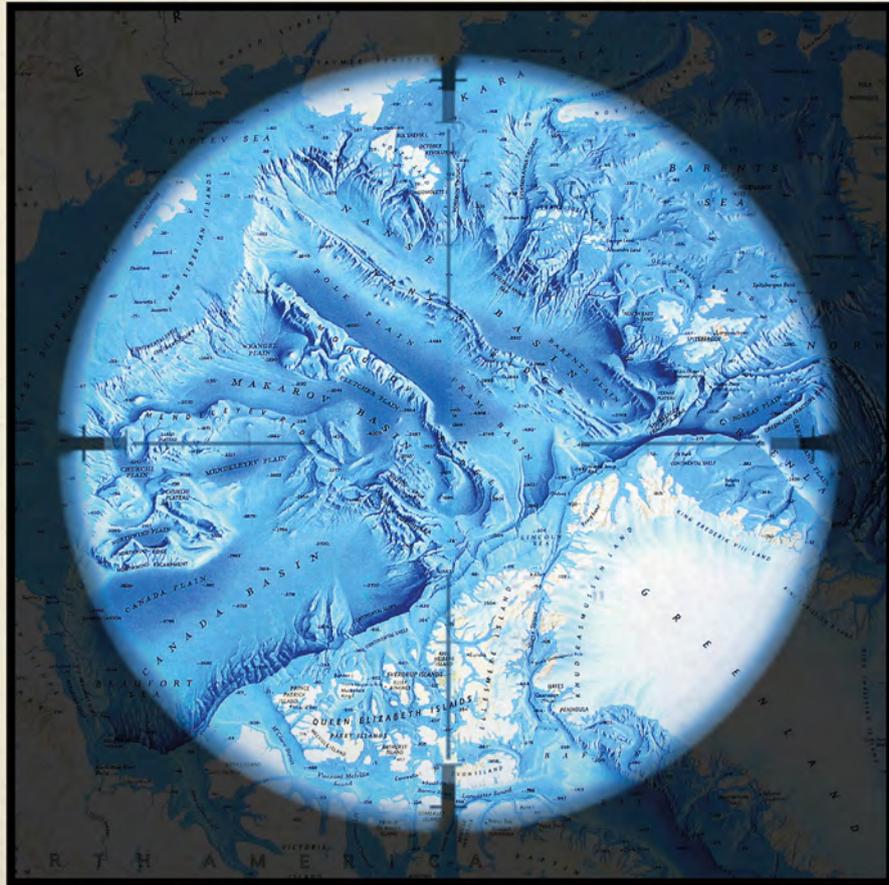
Oublier Moby Dick, série documentaire d'Aline Pénitot, réalisée par Gilles Mardirossian, France Culture, 2019

How human noise affects ocean habitats, conférence de Kate Stafford, TED, 2017

François Sarano, Le retour de Moby Dick. Ou ce que les cachalots nous enseignent sur les océans et les hommes, Actes Sud, 2017

3 > Laboratoire d'Informatique et des Systèmes. CNRS, Université d'Aix-Marseille, Université de Toulon

4 > Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés. CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, ENTPE



36

GÉOPOLITIQUE

L'ÉPINEUX COMPROMIS DU PARTAGE DES OCÉANS

Par Grégory Fléchet

Couvrant près des trois quarts du globe, les océans sont tout autant indispensables au maintien de la vie sur Terre et à la régulation du climat qu'au développement du commerce mondial et à l'expression de la souveraineté des États côtiers. Avec le découpage juridique de l'océan mondial, qui n'a fait que s'intensifier depuis la seconde moitié du XX^e siècle, concilier ces enjeux contradictoires s'avère de plus en plus délicat.



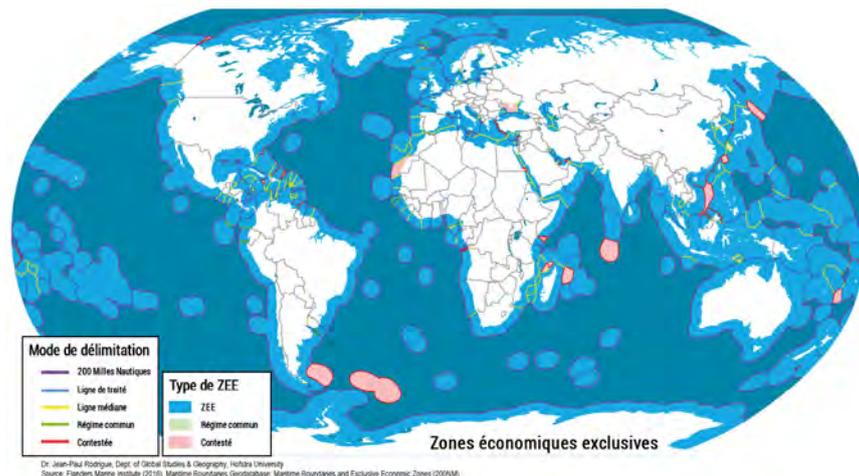
À l'ère de la mondialisation à tous crins, l'océan est devenu un espace éminemment stratégique. Plaque tournante de l'économie globalisée par laquelle transite la plupart de nos marchandises, cette vaste étendue liquide est plus que jamais sous la menace des activités humaines : surexploitation des ressources naturelles, réchauffement climatique, explosion du trafic maritime international et pollutions en tout genre viennent perturber le fonctionnement des écosystèmes marins. Malgré les pressions

toujours plus fortes qui s'exercent sur l'océan, sa protection ne reste encore qu'un vœu pieux. « *Bien que la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) impose aux 168 États signataires de protéger le milieu marin et d'en exploiter les ressources de manière durable, ces obligations restent très peu appliquées en raison des difficultés pratiques qu'implique la surveillance des activités sur un territoire aussi vaste* », explique Kiara Neri, maître de conférences en droit public et directrice du Centre de droit international de l'Université Jean Moulin Lyon 3 ➔

› Comblé le vide juridique de la haute mer

Depuis son entrée en vigueur, en 1994, la CNUDM a surtout donné lieu à la création de nouvelles délimitations maritimes au premier rang desquelles figure la zone économique exclusive (ZEE). D'une largeur maximale de 200 milles nautiques, soit environ 370 km, à partir du trait de côte, ce territoire est attribuable à tout État possédant une façade maritime. Ce dernier y dispose de droits souverains pour l'exploration et l'exploitation du sol et du sous-sol ainsi que pour la gestion et la conservation des ressources halieutiques¹.

Au-delà de cet espace maritime, commence le domaine de la haute mer. Du point de vue du droit international, cette immense étendue qui couvre près des 2/3 des océans appartient à la fois à tout le monde et à personne. À ce titre, la navigation comme la pêche peuvent y être exercées en toute liberté. « *Faute d'une autorité internationale dédiée à la haute mer, la compétence exclusive du pavillon de l'Etat prévaut, ce qui a pour conséquence de limiter les actions de police de chaque pays aux navires arborant leur pavillon* », détaille Kiara Neri. Relevant de l'Autorité internationale des fonds marins, créée sous l'égide de la CNUDM, le sol et le sous-sol de la haute mer relèvent pour leur part du « *patrimoine commun de l'humanité* », ce qui rend théoriquement impossible l'appropriation des ressources minérales qui s'y trouvent. Mais en l'absence d'une réglementation contraignante, les contrôles demeurent inexistantes. Le vide



juridique qui pèse sur les océans au-delà des juridictions nationales pourrait toutefois bientôt être comblé.

Sanctuariser des aires marines

Depuis plusieurs années, les Nations unies planchent en effet sur l'élaboration d'un nouvel accord englobant la colonne d'eau et les fonds marins de la zone de haute mer. Le futur traité a pour ambition de renforcer la protection de la biodiversité marine par la mise en place de nouveaux outils comme la création d'aires marines protégées dans les eaux internationales. Après un ultime cycle de négociations qui s'achèvera en 2021, le traité devra ensuite être ratifié par une cinquantaine d'États pour pouvoir entrer en vigueur, ce qui prendra sans doute une dizaine d'années de plus.

« Il serait tout à fait possible d'accélérer la création d'aires marines protégées en haute mer »

Kiara Neri

Maître de conférences en droit public et directrice
du Centre de droit international de l'Université Jean
Moulin Lyon 3.

¹ > Du grec *halieutikos*, qui concerne la pêche.



LA MER DE CHINE MÉRIDIONALE SOUS TENSION

À contre-courant de ces atermoiements, la communauté scientifique et les associations de protection de l'environnement appellent à sanctuariser 30% des océans d'ici 2030, contre à peine 4% à l'heure actuelle. Si l'objectif peut sembler très ambitieux, il s'agit en fait du niveau de protection minimum pour pouvoir mettre en place un réseau de réserves représentatives de la biodiversité marine mondiale. « *En s'appuyant sur les structures juridiques existantes, comme les organisations régionales de gestion des pêches, il serait tout à fait possible d'accélérer la création d'aires maritimes protégées en haute-mer, estime Kiara Neri. Des initiatives telles que la convention OSPAR, qui œuvre à la protection du milieu marin dans l'Atlantique du nord-est par un maillage d'aires marines protégées écologiquement cohérent, pourraient également être dupliquées à d'autres régions océaniques.* »  suite p.42



© Crédits DR

« Faute d'une autorité internationale dédiée à la haute mer, la compétence exclusive de pavillon de l'État prévaut »

Kiara Neri

Comparé au climat de relative sérénité qui accompagne les velléités d'expansion territoriale et économique des nations de l'Arctique, le conflit qui agite la mer de Chine méridionale a des allures de poudrière. Cette zone maritime disputée depuis plusieurs décennies par la Chine et la plupart des autres pays qui la bordent (voir page 43) a connu un regain de tensions à partir de 2013 dès lors que Pékin a entrepris d'aménager plusieurs récifs coralliens de l'archipel des Spratleys. Dotés de pistes d'atterrissage, de dépôts de carburant, de ports et de systèmes de détection radar, ces îlots artificiels constituent aujourd'hui de véritables postes de contrôle avancés sur cette mer de Chine méridionale que l'empire du Milieu juge essentielle à sa sécurité. « *Dans un arrêt rendu le 12 juillet 2016, la Cour permanente d'arbitrage (CPA) de La Haye a estimé qu'aucune des terres émergées de l'archipel des Spratleys ne répondait à la définition d'une île capable, notamment grâce à la présence d'eau potable, d'accueillir une vie humaine autonome, rappelle Frédéric Lasserre. Autrement dit, les récifs aménagés par la Chine ne peuvent disposer d'une ZEE de 200 milles nautiques tel que le prévoit la CNUDM pour chaque territoire insulaire.* » Si Pékin, qui estime détenir une souveraineté historique sur la quasi-totalité de la mer de Chine méridionale, a logiquement refusé de se plier au verdict de la CPA, la définition juridique de l'île qui l'accompagne constitue un précédent susceptible de remettre en question l'existence de nombreuses ZEE, à l'image de celle qui entoure Clipperton, cette possession française composée d'un minuscule atoll perdu dans l'est de l'océan Pacifique Nord.



© Crédits US Navy

Au nom de la liberté de circulation et de la protection des pays riverains, les Etats-Unis mènent régulièrement des patrouilles militaires en mer de Chine méridionale.

REPRÉSENTATION DE L'OcéAN AU LONG DE L'HISTOIRE

Alors que la Terre est majoritairement couverte d'eau, sa représentation cartographique a longtemps privilégié la visualisation des masses continentales au détriment des océans. Avec l'avènement des grandes explorations maritimes, les humains ont soudain pris conscience que ces masses d'eau étaient toutes reliées entre elles. Face à la difficulté de mettre en image cet océan global, les cartographes ont su faire preuve d'audace et de créativité pour donner à voir la dominance aquatique de notre belle bille bleue.



La Mappa Mundi d'Hereford.

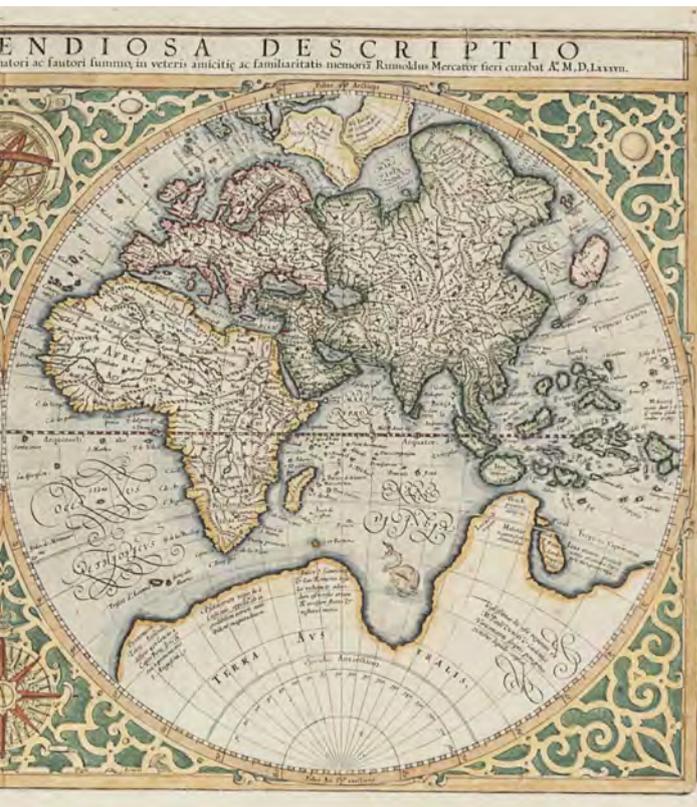
Sur les mappemondes médiévales, telle que cette "carte du monde" datant de la fin du XIII^e siècle, l'océan s'apparente à un espace inconnu encerclant les zones terrestres. Cette représentation du monde, tel que le conçoivent les Européens au Moyen-Age, divise la Terre en trois continents séparés par la Mer Méditerranée : l'Asie y occupe le demi-cercle supérieur, l'Afrique le quart inférieur droit et l'Europe le quart inférieur gauche..



Projection de Mercator

Vers la fin du XVI^e siècle, les normes de représentation du monde sont fixées par la communauté des cartographes flamands, à laquelle appartient Gerardus Mercator. Sur cette carte dessinée en 1587 par son fils Rumold, l'exagération du décalage longitudinal de l'Amérique du Sud par rapport à l'Amérique du Nord laisse la place à une "Mar del Zur" dans l'actuel Pacifique et à une "Mar del Nord" au niveau de l'Atlantique. L'existence de l'immense Terra Australis, qui occupe une large partie de l'hémisphère sud, ne sera réfutée qu'à la fin du XVIII^e siècle, à la suite du deuxième voyage de James Cook.





Nouvelle mappemonde La première tentative de représentation des océans comme une étendue unique et indivisible remonte à 1760. Elle est l'œuvre de l'ingénieur français Nicolas-Antoine Boulanger. Très novatrice pour l'époque, cette représentation divise le monde en un "hémisphère terrestre" réunissant toutes les terres émergées connues et un "hémisphère maritime" révélant toute l'étendue des masses d'eau de notre planète.



© Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France



Les océans au centre du monde Cette carte conçue en 1942 par le géophysicien et océanographe sud-africain Athelstan Spilhaus propose une représentation de la Terre centrée sur les océans. Sur ce planisphère quelque peu déroutant, les pôles sont placés en Amérique du Sud et en Chine. Si ce parti pris a pour effet de déformer significativement les continents, il révèle combien les océans du globe forment en réalité une même masse d'eau liquide.



Dymaxion Air-Océan-Monde Fruit de l'imagination de l'architecte américain Buckminster Fuller, cette projection élaborée en 1954 avec le concours du cartographe japonais Shoji Sadao se compose de vingt triangles individuels pouvant être agencés de multiples manières. Grâce à cette flexibilité qui permet de s'affranchir des habituelles conventions cartographiques, où le Nord est toujours placé en haut et le Sud en bas, l'océan global peut être représenté d'un seul bloc...

› La nouvelle géopolitique de la fonte des glaces

Tandis que le principe d'une protection à grande échelle de l'océan commence à faire école, le partage de certaines zones maritimes reste l'objet d'âpres débats. Il en va notamment ainsi de l'océan Arctique. Sous l'effet du réchauffement climatique, l'étendue de la banquise y diminue un peu plus chaque été, attisant les revendications territoriales des États riverains : Russie, Norvège, Danemark et Canada ont rendu publiques leurs prétentions concernant l'extension de leurs ZEE sur le plateau continental, comme la CNUDM les y autorise, à condition que cet espace soit constitué par le prolongement physique de leur plateforme continentale en mer. « Toutes ces revendications¹ ont été déposées sans que cela ne fasse l'objet d'aucun recours de la part des autres parties, les différends éventuels entre États se réglant en général sur le mode de la conciliation en se servant par exemple du Conseil de l'Arctique comme support de médiation », détaille Frédéric Lasserre, professeur de géographie à l'Université Laval de Québec et directeur du Conseil québécois d'études géopolitiques.

Au-delà des revendications territoriales, la région de l'Arctique est le théâtre d'une lutte d'influence pour le développement de nouvelles routes commerciales. Seule nation au monde à disposer d'une flotte de brise-glaces nucléaires capables d'ouvrir des chenaux dans les banquises les plus épaisses, la Russie compte bien miser sur cet avantage stratégique pour donner une envergure internationale à la route maritime qui longe ses côtes septentrionales. Tout comme l'itinéraire empruntant le passage du Nord-Ouest, côté canadien, la route maritime du Nord (ou passage du Nord-Est) permettrait de raccourcir de plusieurs milliers de kilomètres le trajet entre de nombreux ports de l'Atlantique et du Pacifique. « Les incertitudes climatiques restent encore trop importantes

« Les incertitudes climatiques restent encore trop importantes en Arctique pour que les transporteurs de marchandises par conteneur (...) prennent le risque d'emprunter ces routes polaires »

Frédéric Lasserre

en Arctique pour que les transporteurs de marchandises par conteneur soumis à des strictes contraintes de juste-à-temps² prennent le risque d'emprunter ces routes polaires », tempère Frédéric Lasserre. La situation devrait malgré tout évoluer à moyen terme. Certaines études scientifiques estiment en effet que la route maritime du Nord pourra être empruntée en été par n'importe quel navire de haute mer dès le milieu de ce siècle.



© Crédits DR

1 >.Faute d'avoir ratifié la Convention sur le droit de la mer, les États-Unis ne peuvent faire de demande d'extension de leur ZEE en Arctique.

2 >.Méthode de gestion de la production en flux tendu qui consiste à coordonner le système de production en fonction des commandes et non des stocks.



ZONES MARITIMES DISPUTÉES : LA PART DE NON-DROIT DE L'OcéAN

La carte juridique des océans dessine un véritable écheveau de lignes épousant les contours des terres émergées.

Ces zones de partage maritime sur lesquelles les États sont parvenus à s'entendre, à force de négociations, font encore l'objet de contentieux entre nations voisines.

Tout comme le tracé des frontières terrestres, la délimitation des espaces maritimes peut être source de conflits. Si le nombre de zones maritimes disputées par plusieurs États reste difficile à évaluer à l'échelle de la planète, ces différends auraient tendance à se multiplier du fait notamment des enjeux économiques associés à ces territoires. Avec un domaine maritime de près de 11 millions de km², le deuxième plus vaste au monde après celui des États-Unis, la France ne compte pas moins de 39 frontières avec 30 pays différents. De quoi susciter des frictions avec ses nombreux voisins. Dans le golfe de Gascogne, le différend qui oppose, par exemple, la France à l'Espagne à propos du tracé de leur frontière commune n'a toujours pas été tranché. À plus de 10 000 km de là, un autre désaccord se cristallise autour de la frontière entre Madagascar et l'archipel français des îles Eparses, disséminées tout autour de la Grande Île.

Absence de cadre juridique

Depuis le milieu du XX^e siècle, près d'une trentaine de litiges ayant trait à la délimitation de zones maritimes ont abouti à des contentieux internationaux. « *La délimitation des espaces maritimes étant censée reposer sur le consentement des États, il n'existe aucun cadre juridique précis sur lequel s'appuyer pour tracer en toute objectivité les contours de ces territoires* », souligne Pierre Musy, doctorant en droit international public à l'Université Jean Moulin-Lyon 3 où il prépare une thèse sur les zones maritimes disputées. Face à cette forme de laxisme juridique, certains États n'hésitent pas à s'approprier en toute impunité

de vastes étendues maritimes pour y exercer des activités de pêche ou y extraire des hydrocarbures. Lorsqu'un pays s'estime lésé par une ou plusieurs autres nations, il a toutefois la possibilité de saisir la Cour internationale de justice ou le Tribunal international du droit de la mer, qui dépendent de l'Organisation des Nations unies. Ces organes judiciaires internationaux ont en effet toute latitude pour prononcer des mesures conservatoires sur un territoire maritime revendiqué par plusieurs États, en attendant que le litige soit résolu à l'amiable ou par une décision de justice.

Vers la fin de l'injustice maritime ?

Mais alors que la plupart des pays privilégient la voie juridique pour régler leurs différends, les grandes puissances maritimes ont souvent tendance à s'y opposer. « *Lorsque la France a ratifié la Convention des Nations unies sur le droit de la mer, en 1996, elle a explicitement refusé les différends liés aux délimitations maritimes* », rappelle Kiara Neri. Dans ces circonstances, il devient impossible pour un autre État en conflit avec la France à propos d'un territoire maritime, de saisir un organe judiciaire compétent ou un tribunal arbitral. Comment dès lors réparer cette forme d'injustice ? C'est tout l'enjeu du projet Zomad³ auquel participe Pierre Musy : « *cette initiative vise à recenser l'ensemble des territoires maritimes disputés à travers la planète, les activités qui s'y déroulent, ainsi que les positions des différents pays qui les revendiquent dans la perspective d'accorder un véritable statut juridique à ces zones grises de l'océan.* »

3 > Ce projet qui a débuté en automne 2018 est coordonné par Alina Miron, professeure de droit international public au Centre Jean Bodin de l'Université d'Angers: <https://zomad.eu/fr/>

POUR ALLER + LOIN :

popsociences.universite-lyon.fr/le_mag



À ÉCOUTER

Interview vidéo de
Kiara Neri

Bibliographie

- **Kiara Neri** (Sous la direction de), (2018), Le Conseil de sécurité des Nations Unies et la mer, Editoriale Scientifica
- **Barthélémy Courmont, Frédéric Lasserre et Éric Mottet**, (Sous la direction de), (2017), Géopolitique de la mer de Chine méridionale, Presses de l'Université du Québec
- **Olivier Le Carrer**, (2017), Océans de papier : Une histoire des cartes marines, Editions Glénats
- **Frédéric Lasserre** (Sous la direction de), (2010), Passages et mers arctiques : Géopolitique d'une région en mutation, Presses de l'Université du Québec



44
ANTIQUITÉ

LES ÉTRUSQUES, DES MARINS SANS PORT D'ATTACHE ?

Par Cléo Schweyer

Jusqu'au 1^{er} siècle avant notre ère, les Étrusques étaient des navigateurs puissants. Leurs flottes de guerre et de commerce ont permis à ce peuple de prendre pied sur une grande partie du bassin méditerranéen. Pourtant, aucun port étrusque n'a jamais été retrouvé. Pour lever ce mystère, des chercheurs lyonnais vont déchiffrer un objet archéologique pas comme les autres : le paysage littoral.

« Les Étrusques étaient de très bons marins, pour le commerce comme pour la guerre. Pourtant, on n'a jamais retrouvé leurs ports, bien qu'on ait localisé les cités étrusques et retrouvé des navires ! » Jean-Philippe Goiran, chercheur en archéogéographie à la Maison de l'Orient et de la Méditerranée de Lyon (MOM)¹, coordonne un ambitieux projet de recherche² autour des ports "perdus" des Étrusques. Une véritable énigme archéologique. « Les Étrusques sillonnaient la Méditerranée : ils contrôlaient par exemple le commerce du vin », confirme Gilles Van Heems, spécialiste des Étrusques à la MOM (Laboratoire HiSoMa) et maître de conférence à l'Université Lumière Lyon 2. « L'historien grec Diodore de Sicile utilise, pour parler de l'Étrurie, le terme de thalassocratie : une puissance économique et militaire fondée sur la domination de la mer ». Cette civilisation raffinée a fleuri dans le centre de la péninsule

italienne du IX^e au 1^{er} siècle avant Jésus-Christ. Elle a fondé de nombreux comptoirs, en Languedoc, en Provence ou en Corse. **Comment est-il possible qu'aucun de ses ports n'ait été retrouvé ou ne soit connu ?**

« C'est d'autant plus étonnant que les Étrusques étaient des ingénieurs de talent, qui ont laissé des fortifications, des aqueducs, des nécropoles », souligne Jean-Philippe Goiran. Avec ce projet, le chercheur s'entoure de spécialistes aux compétences variées, pour explorer une hypothèse de travail inédite : et si les ports étrusques ne ressemblaient pas aux ports que l'on connaît ? Il serait alors inutile de chercher de lourds aménagements, semblables aux ports romains (bâti plus tardivement) ou à nos ports modernes. Pour percer le mystère, il faudrait commencer par réapprendre comment les peuples de cette période vivaient avec la mer. 

À REGARDER

Vidéo : Les ports perdus des Étrusques

→ popsciences.universite-lyon.fr/le_mag/



¹ > CNRS – Université Lumière Lyon 2 - Université Claude Bernard Lyon 1 - Université Jean Moulin Lyon 3 – Université Jean-Monnet Saint-Etienne – ENS de Lyon

² > Projet "Des thalassocraties sans port : mythe ou réalité ?" (2020-2022), doté de 1,2 millions d'euros dans le cadre de l'appel à projets IDEX Scientific Breakthrough de l'Université de Lyon.

› Une civilisation résolument tournée vers la mer

Les Étrusques auraient-ils tout simplement pu se passer de ports ? Non, répond l'archéologue de la MOM Pascal Arnaud, professeur à l'Université Lumière Lyon 2 et spécialiste d'histoire maritime : « *Dans l'Antiquité, le commerce est fondé sur l'exclusion : vous pouvez faire du commerce chez moi si, et seulement si, je vous en ai donné le droit.* » Il faut donc être puissant sur mer pour faire valoir son droit : « *Une thalassocratie implique des infrastructures pour peser et stocker les marchandises, pour régler les litiges, pour exercer le contrôle fiscal et, bien sûr, décharger les bateaux. Sans oublier une marine de guerre !* »

Or, la puissance commerciale et maritime des Étrusques ne fait aucun doute : « *C'est avéré à travers de nombreuses sources* » confirme Gilles Van Heems. Des sources littéraires d'abord, qui rassemblent les récits d'historiens grecs et romains (Hérodote, Diodore de Sicile) ou des fictions comme le mythe grec de Dionysos : le jeune dieu, enlevé par des pirates qualifiés de Tyrrhéniens (nom qui en grec peut désigner les Étrusques), fait pousser la vigne sur le mât du navire pour les effrayer. Ce mythe, connu et apprécié par les Étrusques eux-mêmes, est parfois interprété comme une référence au monopole étrusque sur le vin. On dispose également de sources archéologiques : navires, amphores. Il est possible de retracer la provenance de ces dernières, car elles avaient une forme spécifique à chaque cité. Les Étrusques ont enfin laissé de nombreuses sources épigraphiques. Des écrits gravés ou peints sur des objets ou des bâtiments, et dont certains témoignent de l'importance de la mer pour eux, des contrats, des inscriptions religieuses... On a ainsi retrouvé une ancre marine en pierre, offerte à Apollon par



© Crédits DR

« Les Étrusques étaient de très bons marins, pour le commerce comme pour la guerre. Pourtant, on n'a jamais retrouvé leurs ports, bien qu'on ait localisé les cités étrusques et retrouvé des navires ! »

Jean-Philippe Goiran

Chercheur en archéogéographie à la Maison de l'Orient et de la Méditerranée de Lyon. .

Sostratos d'Égine, un marchand du VI^e siècle qu'Hérodote présente comme l'homme ayant réalisé le plus important profit jamais connu dans le commerce maritime.

Malheureusement, la langue étrusque est aujourd'hui encore mal comprise, ce qui rend difficile l'exploitation de ces sources épigraphiques. Et aucune source connue ne renseigne sur l'organisation des ports. « *À cette époque, on n'écrivait pas sur les ports car c'était un sujet trivial* », rappelle Gilles Van Heems. Pascal Arnaud confirme : « *Il faut lire les récits de batailles navales pour imaginer les ports, à partir d'éléments comme le nombre de navires saisis ou la manière dont la prise de la ville s'est déroulée.* » Les chercheurs réunis autour de Jean-Philippe Goiran font le pari que pour retrouver un port, il faut chercher une fonction avant de chercher un objet matériel. Comment s'y prendre ?

📌 suite p.50

☰ DANS LES PORTS ANTIQUES, LES PEUPLES ÉCHANGENT ET FRATERNISENT

Dans les ports de l'époque étrusque (IX^e au I^{er} siècle avant Jésus-Christ), les peuples pratiquent les mêmes cultes et nouent des alliances commerciales et familiales. « *La fraternité est indispensable pour s'en sortir dans le commerce international : fraternité familiale, fraternité entre les concitoyens et fraternité religieuse* », souligne Pascal Arnaud, archéologue et spécialiste de l'histoire maritime. « *Les familles se transmettent, de génération en génération, des tessères d'hospitalité : de petites tablettes qui prouvent les liens noués avec une autre famille, dans un autre comptoir maritime* », raconte ainsi l'étruscologue Gilles Van Heems. Il rappelle que les comptoirs, implantations maritimes et commerciales, sont loin du modèle colonial que l'on a souvent en tête aujourd'hui. Ce sont des espaces d'"interculturalité", comme à Lattes (Languedoc) où les Gaulois étaient fortement impliqués dans la gestion du commerce. Dans les zones portuaires, des marins de toute la Méditerranée prient épaule contre épaule au sein des mêmes sanctuaires. « *Les divinités universelles se développent très rapidement en contexte maritime. Le temple, c'est la digue qui ne cède pas quand les autres digues ont cédé* », éclaire Pascal Arnaud. Les célèbres lamelles de Pyrgi, des tablettes d'or gravées apposées sur les portes du temple de la cité portuaire, sont rédigées en étrusque et en phénicien. Le sanctuaire était d'ailleurs consacré à la déesse Uni, qui est l'équivalent de Héra

pour les Grecs et d'Astarté chez les Phéniciens. Notre vision de la vie en Méditerranée est ainsi en partie fautive : nous imaginons à tort un monde grec côtoyer un monde étrusque, sur le modèle des états-nations modernes. Dans la Méditerranée antique, on trouve au contraire des espaces linguistiques ouverts, où la notion d'identité nationale telle que nous l'entendons n'existe pas. « *On pense avec les idées de son temps* », résume Pascal Arnaud. Un regard que l'archéologie d'aujourd'hui contribue à renouveler.



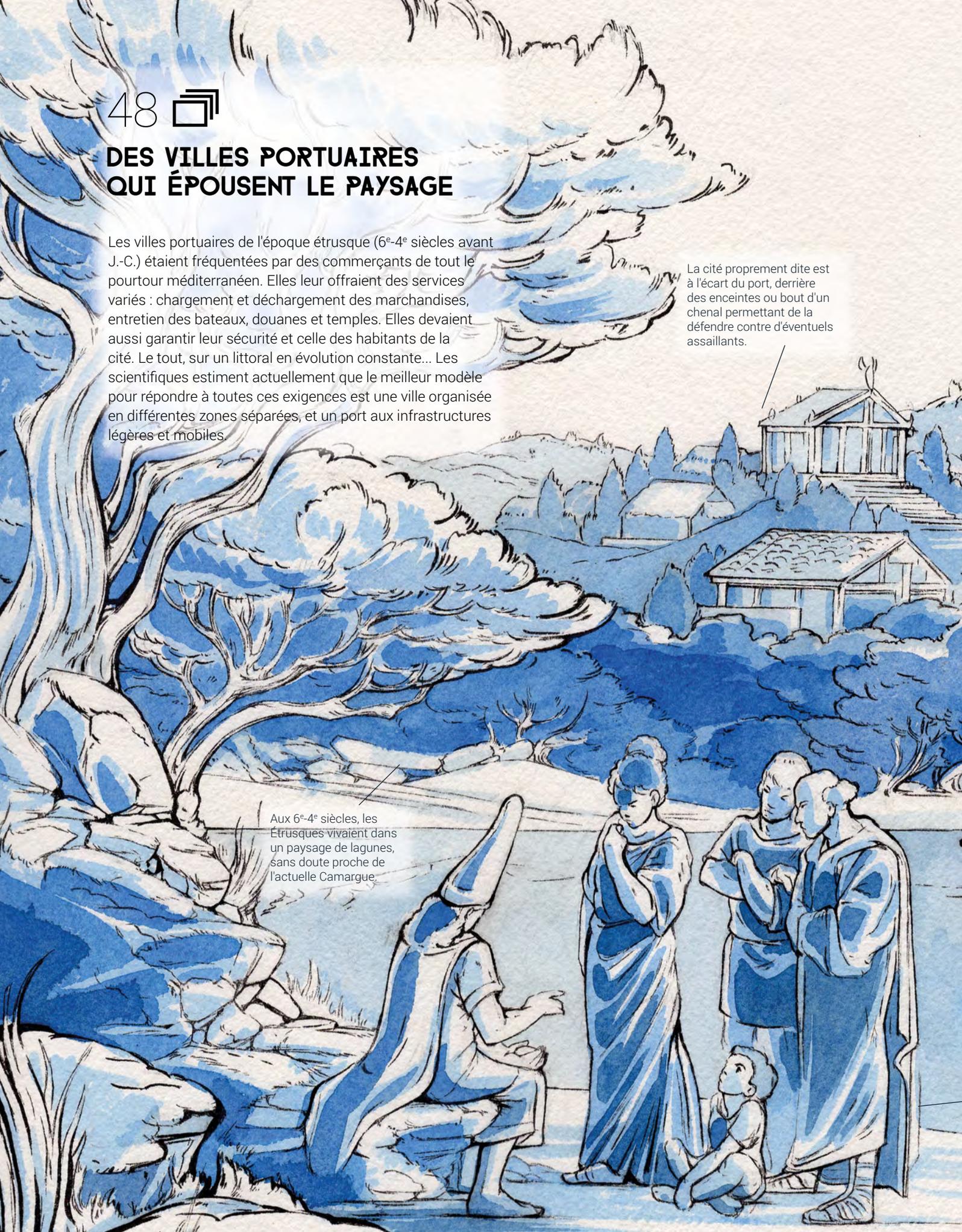
Les célèbres lamelles de Pyrgi, des tablettes d'or gravées apposées sur les portes du temple de la cité portuaire, sont rédigées en étrusque et en phénicien.

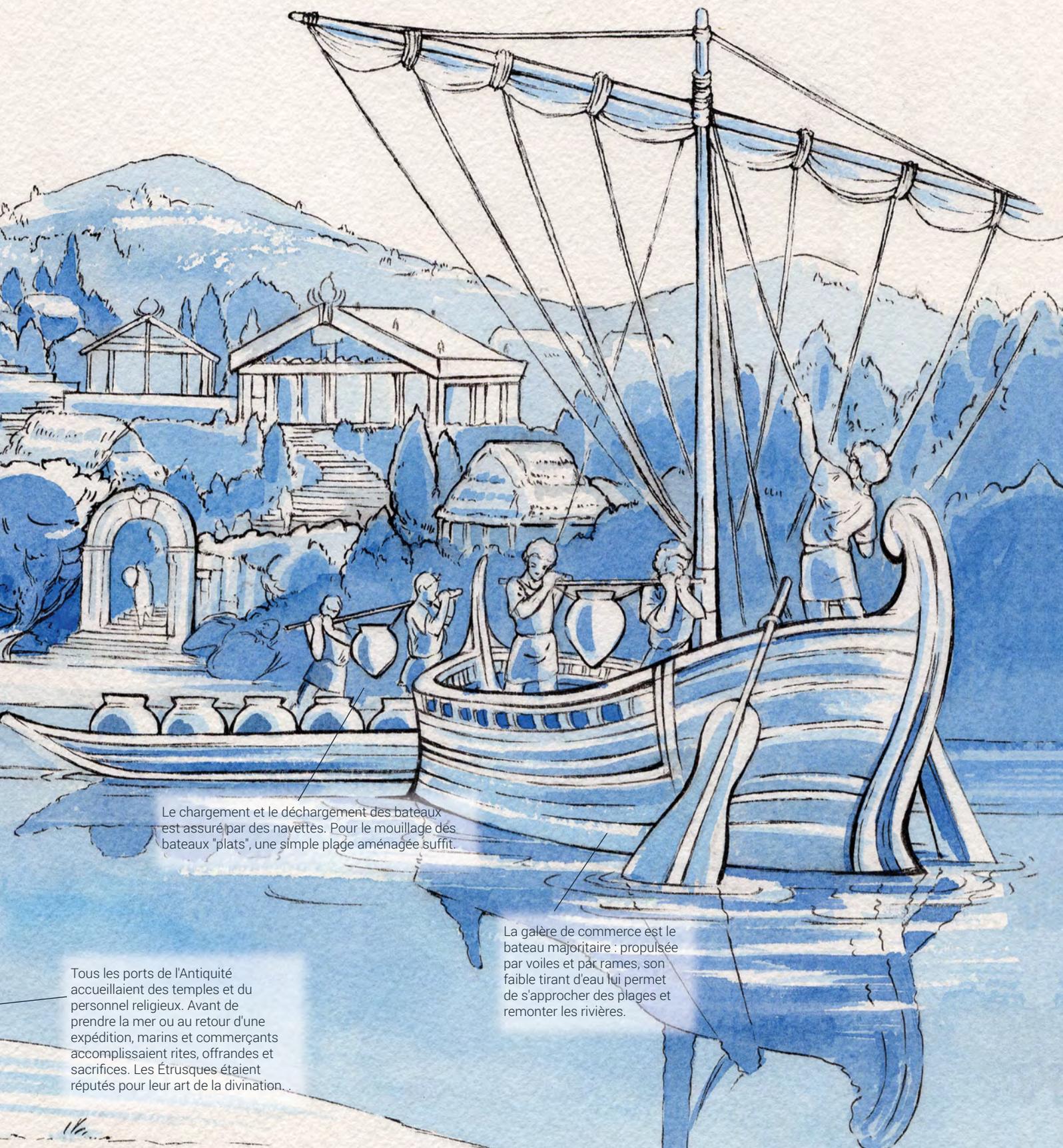
DES VILLES PORTUAIRES QUI ÉPOUSENT LE PAYSAGE

Les villes portuaires de l'époque étrusque (6^e-4^e siècles avant J.-C.) étaient fréquentées par des commerçants de tout le pourtour méditerranéen. Elles leur offraient des services variés : chargement et déchargement des marchandises, entretien des bateaux, douanes et temples. Elles devaient aussi garantir leur sécurité et celle des habitants de la cité. Le tout, sur un littoral en évolution constante... Les scientifiques estiment actuellement que le meilleur modèle pour répondre à toutes ces exigences est une ville organisée en différentes zones séparées, et un port aux infrastructures légères et mobiles.

La cité proprement dite est à l'écart du port, derrière des enceintes ou bout d'un chenal permettant de la défendre contre d'éventuels assaillants.

Aux 6^e-4^e siècles, les Étrusques vivaient dans un paysage de lagunes, sans doute proche de l'actuelle Camargue.





Le chargement et le déchargement des bateaux est assuré par des navettes. Pour le mouillage des bateaux "plats", une simple plage aménagée suffit.

Tous les ports de l'Antiquité accueillait des temples et du personnel religieux. Avant de prendre la mer ou au retour d'une expédition, marins et commerçants accomplissaient rites, offrandes et sacrifices. Les Étrusques étaient réputés pour leur art de la divination.

La galère de commerce est le bateau majoritaire : propulsée par voiles et par rames, son faible tirant d'eau lui permet de s'approcher des plages et remonter les rivières.

› À Pyrgi, on analyse les archives sédimentaires

Pour comprendre la démarche adoptée par l'équipe de Jean-Philippe Goiran, arrêtons-nous un instant à Pyrgi, cité balnéaire de la côte tyrrhénienne, à soixante kilomètres au nord de Rome. Pyrgi, avec ses plages et son château médiéval juché sur des remparts qui plongent dans la mer, est un site étrusque avéré. C'était, estiment les archéologues, l'un des ports de la métropole étrusque de Caeré, à une quinzaine de kilomètres de là. Pyrgi était sans doute composée d'une zone portuaire, d'une zone résidentielle et, à plusieurs centaines de mètres au sud-est, d'une zone sacrée comprenant au moins deux temples dont les traces sont encore visibles aujourd'hui. Pyrgi est au centre du projet coordonné par Jean-Philippe Goiran. Deux démarches d'enquête sont mises en œuvre : une démarche archéologique, qui consiste à rechercher des traces matérielles d'un éventuel port, et une démarche paléo-environnementale, qui consiste à reconstituer le paysage du VI^e siècle pour déterminer s'il était compatible avec la présence d'un port. Dans les deux cas, aucune fouille ne sera menée : toutes les méthodes de recherche employées sont non-destructrices.

« On a commencé par pratiquer des carottages : prélever des échantillons de terre de 30 centimètres de diamètre sur plusieurs mètres de profondeur », expose Jean-Philippe Goiran. L'analyse des sols livre, en effet, de précieuses informations sur l'histoire d'un site. Ils contiennent des sédiments, dépôts laissés au cours du temps par l'érosion, les vents et l'écoulement des eaux et qui forment des couches "en millefeuille" : plus on creuse profond, plus on remonte dans le temps.

Ils sont les témoins de l'activité humaine et de l'évolution de l'environnement : on parle d'archives sédimentaires. Un port à Pyrgi serait ainsi signalé par la présence dans les sédiments de vases noires, de traces de métaux lourds comme le plomb, de fragments d'amphores ou d'outils de pêche. Mais les archives sédimentaires permettent également de reconstituer l'endroit où se situait le bord de mer (la "ligne de côte"). « *A cause de la déforestation, la terre a progressé sur la mer d'environ 1,3 kilomètres par siècle pendant l'Antiquité* », rappelle Pascal Arnaud.

« Le paysage de l'époque a pu être proche de celui de la Camargue actuelle »

Christophe Bénech

Archéologue et géophysicien à la Maison de l'Orient et de la Méditerranée de Lyon

Les carottages déjà réalisés ont permis aux scientifiques de formuler une hypothèse sur l'emplacement de la ligne de côte au VI^e siècle, repéré grâce aux différences entre les sédiments récoltés. Il y aurait eu à Pyrgi une lagune suffisamment profonde pour que les Étrusques y construisent un bassin portuaire !

Un nouvel objet archéologique, le paysage

Pour confirmer cette hypothèse, il faut pouvoir analyser les sédiments sur une vaste surface grâce à la prospection géophysique. L'archéologue et géophysicien Christophe Bénech et

ses équipes à la MOM, sont capables de "voir" l'intérieur du sol en laissant la surface intacte. Différentes techniques de prospection géophysique existent. Pour reconstituer un paléo-environnement, la prospection électrique est la plus efficace : le principe est de faire dans le sol une ligne de 80 électrodes et d'y envoyer du courant électrique. Plus les électrodes sont écartées, plus la prospection est profonde. « *On mesure les propriétés électriques du sol : sables et argiles sont très conducteurs, les roches beaucoup moins* », éclaire Christophe Bénech. En quadrillant méthodiquement le terrain, il sera en mesure de détecter un éventuel bassin lagunaire ou la trace d'une ancienne rivière : « *Le paysage de l'époque a pu être proche de celui de la Camargue actuelle* », propose-t-il. En complément de cette lecture en sous-sol, l'architecte et chercheur Renato Salieri, spécialiste de la visualisation urbaine en 3D, effectuera des survols de la zone avec un drone : c'est la photogrammétrie : « *On prend des centaines de photographies aériennes, puis on les traite avec une chaîne logicielle conçue dans notre laboratoire, le MAP³* », détaille l'expert. Au terme d'un long processus de calcul, des images du site en 3D sont extraites à partir de ces images. La 3D sera utilisée pour présenter les résultats, mais aussi pour tester les hypothèses au fur et à mesure qu'elles se préciseront.

Le travail qui commencera à Pyrgi à l'automne 2020 devrait nous amener à porter un regard nouveau sur l'histoire de la Méditerranée, si familière et pourtant si mystérieuse encore. Et c'est en étudiant un objet encore inhabituel, le paysage, qu'une énigme archéologique majeure pourrait bien être résolue.

3 > Laboratoire Modèles et simulation pour l'architecture et le patrimoine (CNRS, Ministère de la Culture, Ecoles Nationales Supérieures d'Architecture de Lyon, Nancy et Paris).

À LA RECHERCHE D'UNE DÉFINITION UNIQUE DU PORT

Avant de se lancer à la recherche des ports étrusques, les différents spécialistes ont dû s'entendre sur une vision commune des ports. Jusqu'à présent, l'archéologue cherchait des installations "en dur", le sédimentologue des rejets urbains (vases noires, métaux lourds), l'historien du droit se penchait sur les problèmes juridiques posés par les fonctions du port... La définition qui réunit tous ces aspects est beaucoup plus ouverte : un port est une interface entre la terre et l'eau, organisée par zones, pour pratiquer le commerce, la pêche ou la guerre maritime. On ne retrouvera donc pas les ports étrusques en cherchant des quais ou des môles, mais en regroupant des indices beaucoup plus légers !

Bibliographie

Pascal Arnaud. Entre mer et rivière : les ports fluvio-maritimes de Méditerranée ancienne. Modèles et solutions.

Jean-Philippe Goiran. Le port perdu d'Ostie.

POUR ALLER + LOIN :

popsciences.universite-lyon.fr/le_mag



Interview vidéo
de Gilles Van Heems

OURS

DIRECTION DE LA PUBLICATION : **Stéphane Martinot**, Administrateur provisoire de la COMUE Université de Lyon

DIRECTION DE LA RÉDACTION : **Florence Belaën**, Directrice Culture, Sciences et Société - Université de Lyon

COMITÉ DE RÉDACTION

RÉDACTION EN CHEF : **Samuel Belaud**, Université de Lyon

RÉDACTEURS JOURNALISTES : **Ludovic Viévard, Benoît de La Fonchais, Grégory Fléchet, Caroline Depecker, Cléo Schweyer, Samuel Belaud**

DIRECTION ARTISTIQUE : **Magdalena Nin, Antoine Ligier** (Agence Visée.A).

CRÉDITS ILLUSTRATIONS : **Solène Rebière, Visée.A**

SECRÉTARIAT DE RÉDACTION : **Patricia Lamy, Isabelle Bonardi** (Université de Lyon)

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Agnès Gahigi (Directrice Générale Adjointe en charge des Investissements d'Avenir à l'Université de Lyon)

Christian George, directeur de recherche en géochimie à l'IRCE Lyon (CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1)

Jean-Philippe Goiran, chargé de recherche en géoarchéologie, Laboratoire Archéorient (CNRS/Université Lumière Lyon 2)

Guillemette Ménot, Professeure en géochimie, Laboratoire de Géologie de Lyon (CNRS/ENS).

Sylvain Pichat, Maître de conférences en géochimie, au Laboratoire de Géologie de Lyon (CNRS/ENS) et au Max Planck Institute (All.)

PARTENAIRES INSTITUTIONNELS



REMERCIEMENTS

à la **Maison de l'Orient et de la Méditerranée (MOM)**, à l'**Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IrcelYon)**, au **Laboratoire de Géologie de Lyon Terre-Planète-Environnement (LGL-TPE)**, au **Centre de droit international de l'Université Jean Moulin-Lyon 3**, au **Laboratoire d'Écologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA)**, au **Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (LMFA)**, à l'**Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon (IP2I)**, à l'**Institut de recherche Chorus** et aux **chercheurs**, aux **artistes**, aux **militants**, aux **personnels**, d'avoir ouvert leur portes (et leur téléphone) à la rédaction de Pop'Sciences Mag, répondu à nos questions et participé à la réussite de ce numéro.

CONTACTER LA RÉDACTION

RÉDACTION EN CHEF : samuel.belaud@universite-lyon.fr

PARTENARIATS ET DIFFUSION : cecile.rondeau@universite-lyon.fr

Si vous souhaitez recevoir un exemplaire gratuit du magazine, merci de bien vouloir en faire la demande par email à l'adresse popsciences@universite-lyon.fr

ISSN : 2680-5987 – Parution : juin 2020 – Dépôt légal à parution
Pop'Sciences est une marque déposée.





**POP'
SCIENCES**
Université de Lyon

RETROUVEZ TOUTE L'ACTUALITÉ SCIENTIFIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LYON SUR LE PORTAIL NUMÉRIQUE POP'SCIENCES !

popsciences.universite-lyon.fr

P comme **Partager les savoirs**
O comme **Ouvrir les campus**
P comme **Produire de la connaissance avec et pour les citoyens...**

Tel est le leitmotiv de Pop'Sciences qui a tout simplement pour objectif de répondre à tous ceux qui ont soif de savoirs, de rencontres, d'expériences, de sons et d'images en lien avec les sciences et les techniques.

Ce portail, conçu et animé par l'Université de Lyon, l'ensemble de ses membres et ses partenaires privilégiés, a quatre fonctions : **un agenda** des activités de culture scientifique et technique dans le territoire de la Métropole de Lyon et du Rhône, **une banque de ressources multimédia** pour tous les thèmes questionnant les sciences et les techniques, **un catalogue des offres et des ressources pédagogiques** pour les scolaires proposés sur notre territoire et **une visibilité sur les collections patrimoniales des universités.**

Au travers du site internet, des productions médiatiques et de nombreux événements tout au long de l'année, Pop'Sciences invite à repenser la place des savoirs produits par nos chercheurs dans une société où le numérique a non seulement accéléré la circulation des savoirs, mais également a pu jeter le trouble entre des savoirs travaillés et des croyances, de l'expertise et des rumeurs.

