

Ça chauffe pour les récifs !

La technique au service des coraux ?

Catalogue de l'exposition



Remerciements

Au nom de tous les élèves de la promotion P2019 de l'École des Mines de Paris, nous souhaitons prendre le temps de remercier toutes les personnes impliquées (de près ou de loin) dans l'organisation de cette exposition.

Merci au Musée Océanographique de Monaco de nous avoir offert un extraordinaire cadre de travail et d'avoir accepté d'accueillir le résultat de notre projet. Merci aux professeurs et enseignants de l'École des Mines de Paris, et du campus de Sophia-Antipolis, pour leur encadrement et leur patience sans-faillie. Merci à Franck Guarnieri, Sébastien Travadel, Justin Larouzée, Aurélien Portelli, Didier Delaitre, Luca Istrate, Myriam Lavigne-Perrault et à Philippe Blanc.

Merci à Laëtitia Hédouin, à Serge Planes et à tous les scientifiques du CRIOBE pour leur engagement déterminant dans ce séminaire et de nous avoir permis d'essayer de mettre en lumière la lutte pour la préservation des récifs coralliens. Merci à Julie Peyrache, à Laurène Faure.

Merci à Nicolas Brunet, Samuel Aubertin et Patrick Fregat, artistes du collectif six point cinq. Merci à Loïc Artieri, à Paul Ardenne. Merci à l'équipe de H2M Images : Mathieu, François, Max, Eldaëlle. Merci à Dezipner numérique.

Merci au Restaurant L'Aurore. Sans vous, ce séminaire n'aurait pas pu avoir lieu et le résultat produit n'aurait pas pu être ce qu'il a été. Merci à toutes les autres parties prenantes qui n'ont pas été citées mais dont l'implication fut indispensable au bon déroulement de cet évènement.

Editorial

L'ingénierie peut-elle sauver les coraux ?

La beauté, la diversité des couleurs, la multitude de formes, et la complexité des paysages formés par les récifs coralliens sont de véritables œuvres d'art naturelles et vivantes. L'originalité de ces œuvres est liée aux milliers d'espèces qui se coordonnent pour vivre ensemble et qui interagissent sur un espace limité pour construire cet écosystème incroyable. Malheureusement, le monde que nous construisons condamne ces œuvres d'art à être éphémères. Le caractère vivant de ces œuvres ne survivra au réchauffement climatique prévu pour la fin du siècle.

Alors, devons-nous mettre des répliques artificielles de ces œuvres d'art dans un musée ? Devons-nous créer des archives inertes des récifs coralliens pour en laisser un souvenir aux générations futures ?

Mais c'est la nature vivante des récifs coralliens qui en font des œuvres d'art. Pensez-vous qu'une photocopie en noir et blanc serait capable de transmettre l'émotion des œuvres de Rodin ?

Les récifs coralliens en plus d'être des œuvres d'art vivantes, fournissent des services inestimables et irremplaçables à un demi-milliard de personnes. Nous sommes aujourd'hui à un moment de notre histoire, où des décisions doivent être prises et assumées. Quel futur

voulons-nous pour les récifs coralliens ?

Aujourd'hui, au travers de cette exposition, se pose la question : Comment les sauver ? Par quelles solutions ? L'ingénierie est-elle la solution face au déclin des récifs ? Cette exposition apporte un regard sur le rôle de l'ingénierie dans sa capacité à sauvegarder une partie du vivant. Entre possible et impossible, entre espoir et désespoir, entre réalisme et surréalisme, cette exposition permet de s'interroger sur un éventail de solutions, qui nous font réfléchir sur les choix futurs que nous voulons pour le vivant.

S'il peut paraître impossible aujourd'hui de sauver les récifs coralliens, il est tout autant impossible pour moi de décider consciemment de ne rien faire et de laisser disparaître ces œuvres d'arts que la nature a créés. S'il est illusoire de croire que l'ingénierie sauvera les récifs dans leur globalité, elle peut peut-être nous aider à sauvegarder une partie de leur diversité, une partie de leurs services, une partie de ces œuvres d'arts, jusqu'à ce que nous réglions le problème à la base : celui du changement climatique. Dans tous les cas, elle nous pousse à nous interroger sur notre interaction avec et sur la nature.

Laetitia Hédouin,

Chargée de Recherches CNRS

Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement CRIOBE

Discours des élèves

Cette exposition, tenue à l'Institut océanographique de Monaco le 4 mars 2023, est le fruit d'un travail condensé en deux jours de 210 élèves de troisième année de l'Ecole des Mines de Paris. A l'occasion de l'inauguration, les élèves ont tenu à adresser les mots suivants à leurs invités :

“Cette exposition est le dernier enseignement de nos années aux Mines et sera pour la plupart d'entre nous le dernier de notre scolarité. Après 3 ou 4 ans de formations, nous avons compris que notre responsabilité première en tant que futur.e.s ingénieur.e.s sera d'accompagner notre société dans ses transformations face aux crises. Nous sommes formé.e.s à affronter les crises de demain et savons que la crise climatique et environnementale constitue le défi de notre génération.

Nous souhaitons alors rappeler avant que cette exposition ne s'ouvre qu'il ne suffira plus de tenter de faire « mieux » pour limiter notre impact négatif sur l'environnement. Les enjeux sociaux, économiques et écologiques nous imposent désormais de faire pleinement face à nos responsabilités. Cela implique de changer de paradigme. De faire autrement. Il s'agit d'une question de survie. Ce constat nous oblige à remettre en perspective les solutions techniques à travers non seulement l'utilité concrète pour les parties prenantes mais surtout l'utilisation raisonnée des ressources naturelles à la lumière des fondements scientifiques.

Notre message n'est pas de rejeter la technologie, mais de rappeler que celle-ci reste un outil et ne constitue pas une finalité. Remettre en cause l'évidence du progrès technique, c'est être fidèle à ses exigences fondamentales : exigence d'émancipation, en prenant du recul face aux solutions proposées ; exigence de justice, en promouvant l'équité face à certaines formes de prédation ; et exigence de lucidité, en sachant intégrer de nouvelles contraintes, car nous devons procéder à des changements structurels autour d'un modèle économique régénératif radicalement nouveau.

C'est avec ce prisme que nous avons abordé le sujet qui nous était proposé. Un sujet que nous avons dû découvrir, appréhender et restituer en un peu plus de deux jours. Nous sommes conscients devant l'étendue du sujet et des connaissances qu'il était impossible en deux jours de révolutionner un domaine dans lequel des chercheurs travaillent depuis des dizaines d'années.

Nous avons alors voulu présenter, humblement, un travail de vulgarisation et parler d'une urgence qui nous touche tous. Nous voulons servir de porte-voix à des chercheurs qui depuis trop longtemps ne sont pas assez entendus et nous espérons que cette exposition donnera aux visiteurs l'envie de s'intéresser plus en profondeur à ce sujet.

Au nom de la promotion P19 de l'Ecole des Mines, nous sommes fier.e.s de vous présenter notre exposition « Ça chauffe pour les Récifs ! La Technique au service des Coraux ? ».”

Sommaire

Remerciements	3
Editorial	4
Discours des élèves	5
Les coraux, organismes complexes et nids de biodiversité	8
Mieux observer pour mieux protéger	12
Modélisation : prévoir l'état des récifs de coraux	16
Coraux, micro-algues et microbiomes	20
Et pour quelques espèces de plus ...	24
Un (r)échauffement pour les coraux ?	29
Une vie plus douce à l'ombre des panneaux ?	33
Une climatisation pour les coraux	38
Etendre les récifs	42
L'Arche de Noé sous-marine	45
Les ingénieurs peuvent-ils sauver les coraux ?	50
Bibliographie	53

ÇA CHAUFFE POUR LES RECIFS

une exposition de MINES PARIS - PSL
en partenariat avec OCEANOMONACO



FLASHEZ-MOI



MINES PSL OCEANOMONACO

*"Introduction - Les coraux en crise", Kakemono, élèves des Mines, Loïc SWEEN
Graphic design, Deizner Numérique, 2023*

Les coraux, organismes complexes et nids de biodiversité

Les récifs coralliens sont au centre de l'écosystème planétaire. Bien qu'ils représentent seulement une partie infime (0.2 %) de la surface des océans, ils concentrent 30% de la biodiversité marine, avec plus d'un million d'espèces d'animaux qui y trouvent nourriture et refuge. À l'origine de ces structures, on retrouve un organisme aussi insolite que passionnant : le corail. Un corail est une colonie de polypes qui se regroupent pour former des superorganismes. Ces polypes vivent en symbiose¹ avec des microalgues : elles réalisent la photosynthèse qui permet de nourrir le corail en échange d'un habitat.

Le mode de reproduction le plus répandu chez les coraux est la fécondation externe, où chaque corail libère à la fois des gamètes mâles et femelles lors de quelques nuits d'été. Lorsque deux gamètes mâles et femelles se rencontrent, ils forment une larve (ou planula) qui va dériver avant de se fixer sur une roche pour former un polype.

La cause du blanchissement des coraux : le dérèglement climatique

Lorsque la température de l'eau augmente de plus d'1°C par rapport à la température maximale normalement atteinte en été, le corail expulse ses microalgues, ce qui conduit à sa dépigmentation. On appelle ce phénomène le blanchissement. Si cette hausse de la température reste brève, ce blanchissement est réversible. Si elle se prolonge, elle conduit à la mort du corail. Certains coraux sont plus résilients face à la

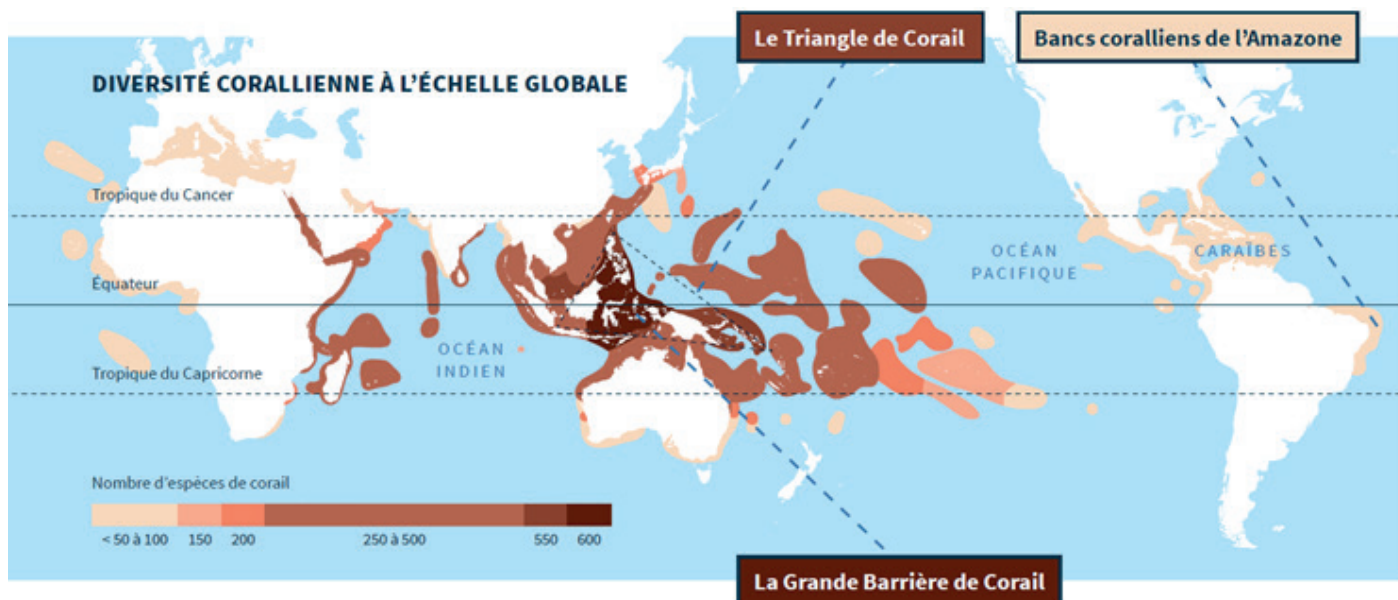
Ce polype va ensuite se multiplier pour former des colonies de milliers d'individus génétiquement identiques. Par un processus de calcification, ces individus se dotent d'un squelette calcaire constituant la base des récifs coralliens. On estime qu'à l'échelle de la planète, les récifs coralliens fabriqueraient plus d'une gigatonne de carbonate de calcium par an. Ces récifs figurent parmi les plus grandes structures complexes construites par des organismes vivants.

Les récifs coralliens sont situés sur l'ensemble de la zone intertropicale dans les différents océans et on note deux zones exceptionnellement riches et denses en biodiversité corallienne : le Triangle de Corail en Asie du Sud-Est et la Grande Barrière de Corail au large de l'Australie. Les coraux se forment principalement en eaux peu profondes, où la lumière est la plus abondante et où la photosynthèse de leurs algues symbiotiques est alors facilitée.

chaleur ; ils ont la capacité de se remettre de cette perturbation plus aisément que d'autres. Cette résilience favorise certaines espèces spécifiques et atteint ses limites en cas d'un dérèglement trop important.

Les vagues de chaleur résultant du réchauffement climatique réchauffent les eaux océaniques et ont déjà conduit à la disparition de la moitié des coraux depuis 1950. Le GCRMN, un réseau

¹ Association mutuellement bénéfique entre plusieurs organismes biologiques distincts.



mondial de scientifiques et d'organisations qui surveillent l'état des récifs coralliens dans le monde entier, souligne une accélération de la disparition des coraux. Le GIEC indique que même en limitant le réchauffement global à 2°C,

99% des coraux auront disparu d'ici 2100. D'autres facteurs participent à ce phénomène : l'acidification des océans, la pollution, la surpêche, la destruction des habitats ou encore la luminosité.

La disparition des coraux : un désastre pour la biodiversité et les êtres humains

La raréfaction des coraux engendre un déclin majeur de la biodiversité. En effet, les récifs coralliens abritent plus de mille espèces par mètre carré et sont interconnectés avec d'autres écosystèmes tels que les herbiers et les mangroves.

Les conséquences ne se limitent pas à l'écosystème marin mais touchent également les hommes. Aujourd'hui, les coraux constituent une ressource alimentaire majeure pour 500 millions de personnes qui dépendent de la pêche dans ces zones présentant une quantité abondante de poissons. Par ailleurs, une grande partie du tourisme local repose sur cette biodiversité aquatique grandiose, qui attire chaque année 15 millions de plongeurs. Ainsi, la valeur générée par les récifs coralliens des territoires français d'Outre-Mer a

été évaluée à 1,3 milliards d'euros par an dont 315 millions issus du tourisme. Les récifs coralliens représentent donc une ressource alimentaire et économique pour certaines zones, souvent isolées, qui pourraient observer une augmentation des inégalités et de la pauvreté avec la disparition des coraux.

Les récifs constituent également des barrières naturelles qui protègent près de 3,5 milliards d'individus vivant à moins de 100 km des côtes. Ces habitations peuvent être menacées par l'érosion du littoral, des tempêtes, ou encore des événements plus intenses comme les tsunamis. Les récifs coralliens absorbent l'énergie des vagues, permettant ainsi de réduire leur taille jusqu'à 70%. Sans leurs coraux, de nombreuses zones pourraient devenir donc inhabitables, ce qui pourrait

conduire à d'importants déplacements de population.

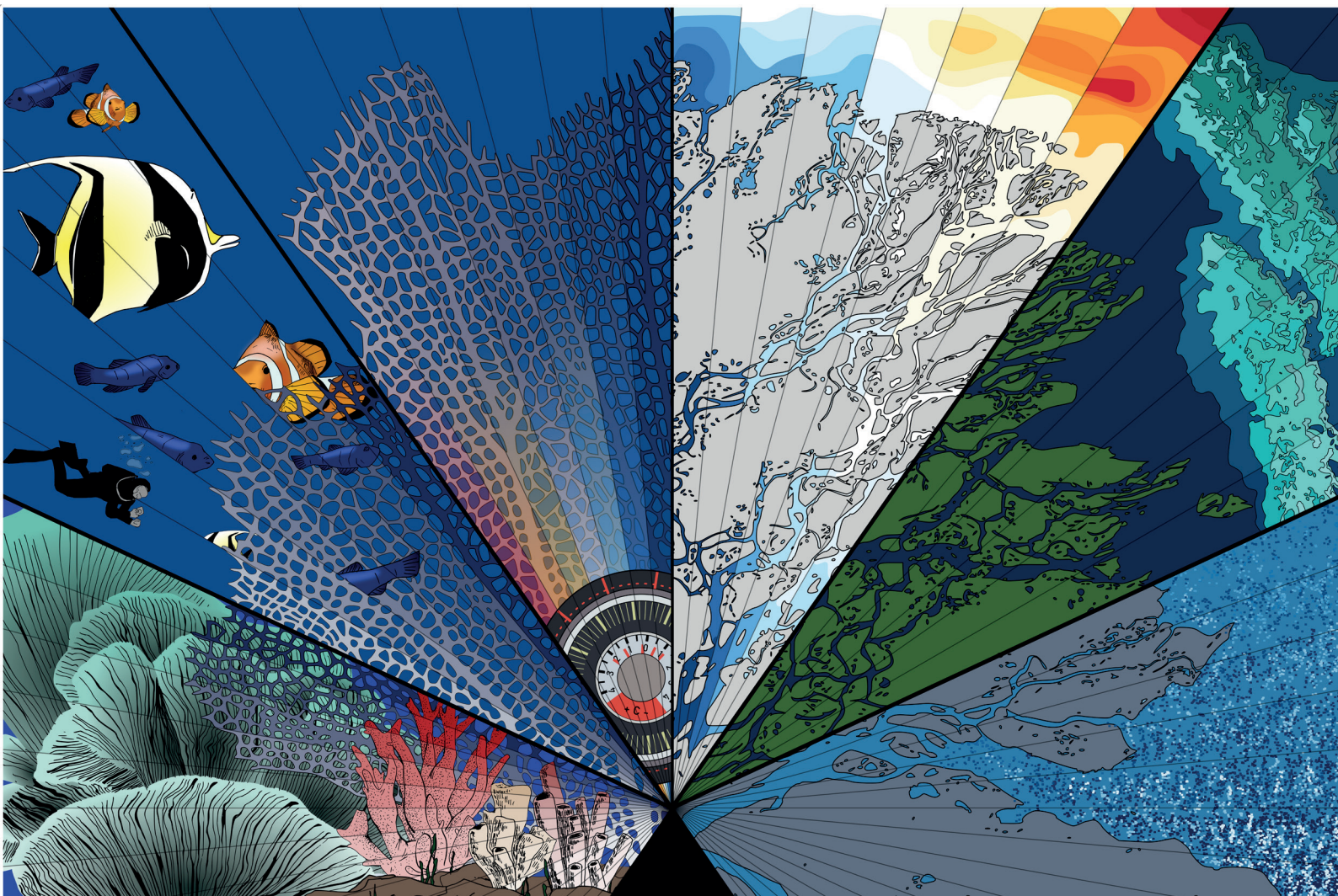
Pour toutes ces raisons, on estime ainsi que les récifs coralliens fournissent l'équivalent de 375 milliards de dollars de biens et services à l'humanité. En

contribuant autant aux écosystèmes marins qu'à la vie humaine, la disparition des récifs coralliens pourrait avoir des conséquences qui dépassent le socle actuel de nos connaissances.

Les solutions d'ingénierie : une réponse court-termiste et insuffisante

L'exposition "Ça chauffe pour les récifs" a pour but de présenter des démarches d'ingénierie : prédictions de scénarios, technique de favorisation de la résilience, augmentation artificielle de la population de corail... Ces propositions ont pour but de sauver certains coraux, dans certaines zones limitées et durant une courte période. Même si elles ne sont pas pérennes, elles peuvent être un "pansement" à mettre en place rapidement pour tenter de sauvegarder une partie des

coraux. Les "solutions" présentées dans cette exposition ne font que traiter les symptômes, sans guérir le problème de fond. Le blanchissement des coraux n'est que l'une des manifestations du phénomène plus général du réchauffement climatique. Tant que l'inaction climatique perdura, les eaux continueront à se réchauffer de façon incontrôlée, et les coraux seront voués à disparaître.



"Mieux observer pour mieux protéger", Impression paysage, élèves des Mines, Nicolas Brunet (6.5), De signer Numérique, 2023

Mieux observer pour mieux protéger

La grande fragilité des coraux nécessite des investigations précises et systématiques pour identifier les paramètres qui influencent leur comportement et leur survie. Il est crucial de mesurer ces paramètres, physiques, météorologiques ou de biodiversité, qui

caractérisent leur état de santé, grâce à des méthodes d'observation et de surveillance des récifs coralliens, pour identifier les zones les plus exposées ou les plus atteintes et celles qu'il serait intéressant de protéger.

Pourquoi et comment observer les récifs coralliens ?

Les observations réalisées répondent au besoin de connaître les différents indices qui définissent l'état des coraux (couverture corallienne, diversité biologique, recouvrement ; mais aussi l'état de l'écosystème qui les entoure : température, oxygène, etc. Ces données nécessitent des méthodes et outils d'observation diversifiés et systématiques, à l'échelle globale comme locale.

Les outils de mesure globaux sont essentiellement des outils spatiaux et aériens, qui permettent une vision globale et étendue des océans. Des méthodologies ont été proposées pour permettre des mesures directes du blanchissement, identifier les conditions favorisant de tels épisodes, mais aussi évaluer les conséquences de la dégradation du récif. La liste suivante n'est pas exhaustive mais donne quelques exemples de méthodes utilisées.

Des températures anormalement élevées sont la cause principale du blanchissement des coraux. Par des observations satellitaires infrarouges, les scientifiques détectent des périodes d'accumulation de stress thermique lors desquelles le risque de blanchissement des coraux est élevé. La détection de ces zones pourrait mener à des

actions locales, ciblées et efficaces pour limiter les impacts irréversibles. En revanche, cette mesure est restreinte aux températures de surface avec une précision spatiale limitée. Elle ne permet pas de mesurer des effets très locaux et les impacts de la topographie du fond marin.

Les observations aériennes ou satellitaires permettent par ailleurs une mesure directe du blanchissement des récifs coralliens. En comparant les images avant et après un épisode de blanchissement, les scientifiques déduisent la quantité de blanchissement. Il faut cependant des conditions météorologiques favorables (pas de nuages, ou de reflets), et que les eaux soient peu profondes pour que cette méthode soit applicable et que les coraux soient visibles. Une autre difficulté vient des algues qui s'installent au bout de quelques jours sur les coraux morts et empêchent une observation simple du blanchissement par imagerie. Des limites techniques empêchent aussi l'observation de récifs qui ne sont pas suffisamment denses et étendus.

Enfin, des méthodes de bathymétrie par satellite (mesure de profondeur des fonds marins) voient le jour, par

exemple en reliant la longueur d'onde de houle marine à la profondeur d'eau. Ces techniques permettent de rendre la bathymétrie rapide et à grande échelle, là où des mesures locales et fastidieuses étaient nécessaires par le passé.

Cependant, certaines informations ne sont pas accessibles par satellite. Les mesures de terrain, obtenues lors de plongées, sont toujours nécessaires. Elles permettent de comprendre par exemple les mécanismes biologiques complexes ou d'estimer la diversité des espèces de coraux et de microalgues – cruciales pour l'alimentation des coraux – qui vivent dans les récifs.

Les méthodes utilisées pour le comptage des espèces peuvent varier. Des zones peuvent être désignées aléatoirement, sur celles-ci les plongeurs comptent et mesurent les colonies

Améliorations et limites des observations

Ces observations doivent assurer des données représentatives, complètes et de qualité, des différents indices utiles à la caractérisation de l'état des récifs coralliens pour améliorer la compréhension et la modélisation du comportement des coraux.

Toutefois, certaines données se révèlent plus difficiles à obtenir. Si les récifs de surface, près des côtes, sont bien étudiés, il est plus ardu de surveiller les récifs de profondeur. En effet, les images satellites, très intéressantes pour des mesures d'ensemble sur les océans, ne peuvent "voir" que jusqu'à 10 à 15 mètres de profondeur. Des stations de mesures autonomes existent aussi en surface, souvent alimentées en électricité par des panneaux solaires hors de l'eau, sur des bouées. En profondeur, cette technique n'est pas envisageable, et on a aujourd'hui systématiquement

coralliennes. Une autre méthode consiste à désigner des zones permanentes qui seront observées périodiquement sur plusieurs années pour pouvoir faire un suivi plus précis et en déduire des informations plus complexes comme le taux de mortalité du corail. L'utilisation de l'intelligence artificielle peut permettre d'analyser automatiquement de grandes quantités de vidéos et en tirer des informations sur la couverture corallienne, et plus de précisions sur la biodiversité.

Les observations actuelles se répartissent donc sur différentes échelles, afin de cerner l'influence de divers paramètres liés aux écosystèmes des récifs coralliens, et notamment ceux dont la variation mène à la destruction des coraux.

recours à des mesures manuelles plus complexes, en plongée ou sous-marin... Pourtant, les récifs de profondeur jouent un rôle capital : plus épargnés par le changement climatique, ils sont un vivier de biodiversité utile pour les récifs plus fragiles en surface. Une meilleure description de leur comportement pourrait ainsi être utile pour une amélioration des prédictions d'épisodes de blanchissement et de mortalité des coraux.

D'autres données utiles pour la surveillance des coraux sont aujourd'hui sous-exploitées. Par exemple, la désoxygénation des milieux marins apparaît aujourd'hui comme un facteur crucial dans la mortalité des coraux. Cette désoxygénation, liée au changement climatique et à l'eutrophisation (excès de nutriments dans l'eau) des zones côtières, est constatée depuis plusieurs

années et est amenée à s'aggraver dans les années à venir au vu du réchauffement global. Les zones d'hypoxie (manquant d'oxygène) augmentent. Les données collectées montrent un accroissement de 4,5 millions de km² (soit près de 9 fois la surface de la France) de l'étendue des eaux hypoxiques, à 200 m de profondeur. L'amplification récente de ce phénomène a causé une diminution de la diversité corallienne ou encore une perte de la diversité génétique menant à un développement accru de pathogènes ou la prolifération destructrice des algues. Il est donc essentiel de développer les mesures de cet indicateur afin de mieux appréhender les causes de mortalité des coraux.

Pour aller plus loin, il serait important de corréler les différentes données entre elles, en particulier celles dont les influences restent méconnues. Les outils de traitement de données actuels pourraient être utiles pour mettre en lumière des influences plus subtiles entre différents paramètres sur la santé des récifs. Par exemple, en joignant luminosité solaire et température, il a été montré qu'une intensité lumineuse trop importante peut devenir un facteur

aggravant quand les coraux commencent à blanchir sous l'effet de la chaleur de l'eau.

Les mesures du blanchissement des coraux ne sont pas toujours représentatives de l'ensemble des territoires. En effet, elles sont soumises à un biais géographique important, et les bases de données contiennent principalement des enregistrements faits dans des pays développés ou dans des zones d'intérêt (Caraïbes, Galapagos, etc.). Ainsi, la plupart des récifs du Pacifique sont peu observés, alors que cet océan abrite la majorité des récifs du monde. De plus, les méthodes de mesure ne sont pas standardisées, et différents protocoles de mesure existent dans le monde. Dans le cas de mesures locales, la classification du corail (sain, blanchissement léger ou sévère, mort) est faite par l'observateur et des erreurs peuvent être commises.

Augmenter le nombre d'observations et améliorer leur répartition spatiale et leur homogénéité permettrait de mieux estimer l'ampleur du phénomène, ainsi que d'améliorer les modèles de prédiction existants.

Mettre les observations au service des politiques publiques en impliquant les parties prenantes

Les observations des récifs, en plus de permettre leur compréhension et un meilleur suivi, permettent également d'orienter des politiques de protection et de constater leurs effets, ainsi que d'impliquer les citoyens dans l'observation et la protection des récifs.

Par exemple, certaines organisations lient les mondes scientifique et politique. Le Réseau mondial de surveillance des récifs coralliens (GCRMN) est un réseau de l'Initiative internationale

pour les récifs coralliens (ICRI), qui vise à fournir les meilleures informations scientifiques disponibles sur l'état et les tendances des écosystèmes des récifs coralliens pour leur conservation et leur gestion. Leur but est de rassembler un maximum de données pour mieux analyser l'état et l'évolution de récifs. Ces analyses permettent de quantifier l'impact des politiques de protection, mais aussi d'orienter et de soutenir ces dernières en fonction des constats scientifiques réalisés. Le but de ce réseau est

également de soutenir et produire des rapports sur les progrès des différentes initiatives internationales.

Par ailleurs, certaines initiatives peuvent servir à prévenir les décideurs et populations. C'est le cas du programme Coral Reef Watch de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sur les zones d'alerte de blanchissement. Il permet une identification des zones où le stress thermique du blanchiment du corail atteint divers niveaux prédéfinis, sur la base de la surveillance par satellite de la température de surface de la mer. Ces niveaux donnent lieu à l'émission d'alertes pour tenir informées les parties prenantes de l'état des écosystèmes.

Les citoyens peuvent aussi être impliqués dans la sauvegarde des récifs au travers d'initiatives de citizen science, par la constitution de dispositifs et de relais locaux d'observation. Par exemple, Eyes of the Reef (EOR) est un réseau communautaire de signalement des menaces pesant sur les récifs d'Hawaï (maladies et blanchiment des coraux, espèces marines envahissantes, etc). Il permet à tous les membres de la communauté et aux utilisateurs de l'océan (utilisateurs réguliers ou récréatifs ; professionnel, chercheurs, pêcheurs...) de contribuer à la protection à long terme des récifs. Initié en 2016 par des scientifiques, Un œil sur le corail est un programme ayant permis d'obtenir des informations sur l'étendue d'un épisode de blanchissement survenu dans les Tuamotu. En plus de permettre la collecte d'observations locales en temps réel, ces initiatives de sciences participatives permettent une sensibilisation des populations aux enjeux et d'initier des changements de comportements. A terme, on peut envisager d'employer ces réseaux pour déployer des actions locales de protection (low-tech) sur des

laps de temps court.

Enfin, les méthodes d'observation des coraux décrites précédemment permettent d'identifier les espèces les plus résilientes et les plus impactées par la hausse des températures marines, ainsi que leur rôle dans les écosystèmes, pour définir des zones de conservation. Par exemple, les aires marines protégées (AMP) sont des espaces délimités en mer qui répondent à des objectifs de protection de la nature à long terme. Le changement climatique et les autres facteurs de stress n'ayant pas un impact égal sur les espèces et les habitats marins, les stratégies de répartition du risque doivent être intégrées à la conception du réseau d'AMP. Afin de minimiser le risque que tous les types de coraux soient tous éliminés par la même perturbation, plusieurs exemples de la gamme complète de coraux doivent être protégés et répartis, avec une représentation de 20 à 40 % de chaque type de récif corallien dans les réserves marines. De plus, il serait intéressant d'inclure les zones identifiées comme des refuges thermiques probables, et susceptibles de ne pas vivre un épisode de blanchissement avant 2050, dans les aires marines protégées.

Si la mise en place d'aire marine protégées bien conçues peut être bénéfique pour les récifs coralliens et le maintien de la biodiversité, et surtout pour les communautés qui dépendent des récifs coralliens, elles n'atténueront pas les effets du blanchissement des coraux induit par le réchauffement climatique. Par conséquent, les actions ciblant la source de l'augmentation des températures mondiales (les émissions de gaz à effet de serre) restent le moyen le plus efficace d'atténuer le déclin continu des récifs coralliens à l'échelle mondiale.

Modélisation : prévoir l'état des récifs de coraux

Qu'est-ce qu'une modélisation ?

Un modèle est un ensemble d'équations mathématiques qui représentent des phénomènes naturels. Il se base sur des hypothèses, mesures et observations établies et perfectionnées par la communauté scientifique. Cela permet d'évaluer numériquement le comportement d'un système physique afin de prédire les états suivants. Les dynamiques modélisées sont influencées par de nombreux phénomènes aléatoires, parfois difficilement modélisables de manière réaliste (limitations techniques). Ces prédictions dépendent donc beaucoup des hypothèses faites

lors de l'implémentation.

Le modèle ReefMod GBR (Yves-Marie Bozec and Peter J. Mumby. Detailed description of reefmod-gbr and simulation result) est utilisé ici pour modéliser l'évolution des colonies de corail sur les récifs de la Grande Barrière Australienne. Ce modèle est constitué d'un ensemble de modélisations comportementales rendant compte de divers phénomènes météorologiques, biologiques et physiques identifiés comme pertinents et impactant le développement des récifs coraliens.

Modèle comportemental des récifs

Le modèle proposé dans le document de M.&M. Bozec & Mumby permet de faire varier plusieurs paramètres, en fonction de ce que l'on souhaite simuler :

- La qualité de l'eau
- Des épidémies d'étoiles de mer (s'appuyant sur des données observationnelles)
- Des évènements exceptionnels : les cyclones
- Le stress thermique

Le modèle permet également de simuler l'impact de la transplantation de coraux (deux scénarios explorés :

essaimer dans les récifs les plus en déficit ; changer ces récifs quand ils atteignent un seuil trop bas).

Les diminutions de radiation permettent effectivement une augmentation de la couverture des coraux : en les modélisant sous la forme de scénarios de diminution de la température de surface de la mer, on obtient une augmentation entre 5 et 10% selon le scénario GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat des Nations unies) choisi.

L'interface de visualisation simplifiée

Afin de rendre accessible les résultats de la modélisation, un poste interactif

est mis à disposition du public, accompagné d'une pancarte explicative. L'objectif est de fournir aux visiteurs de l'exposition une manière de constater eux même les effets de scénarios facilement interprétables.

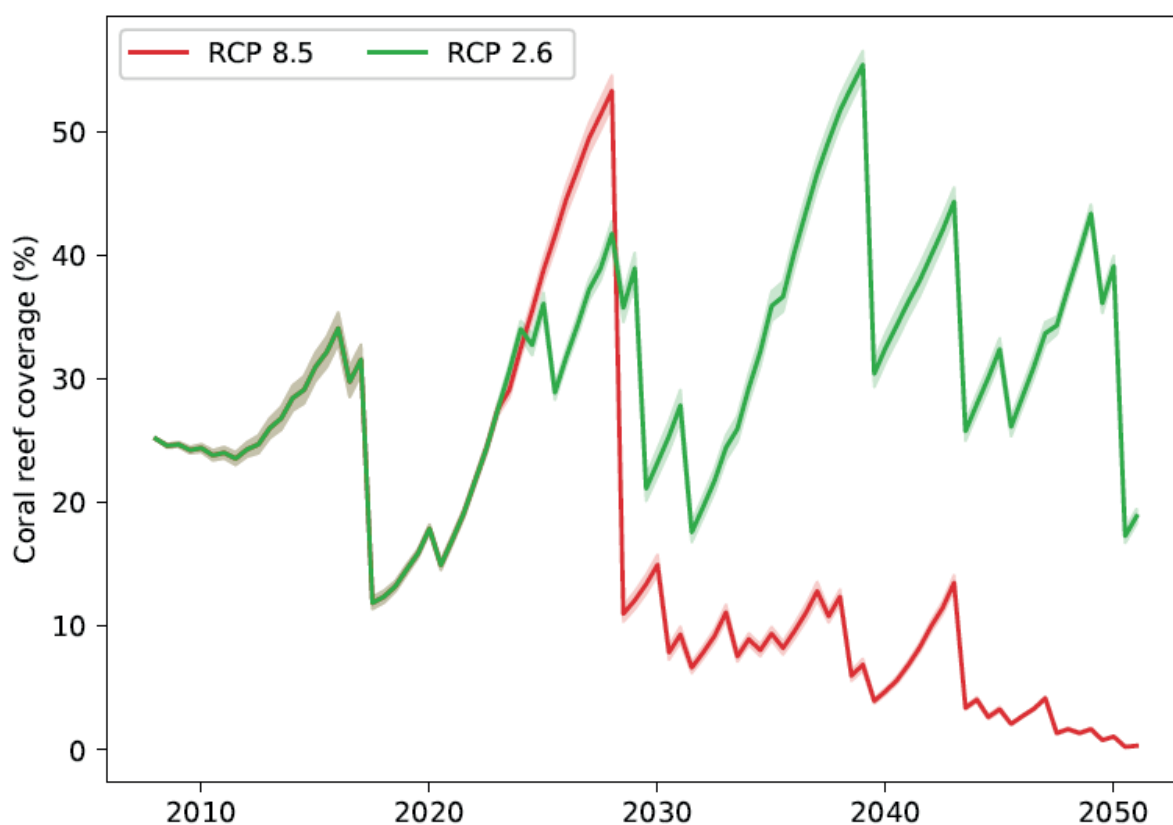
En choisissant de régler les paramètres selon certaines valeurs discrètes, une simulation s'affiche à l'écran et visualise sur une carte de la Grande Barrière des indicateurs de l'état de santé des récifs. S'affichent à côté des courbes temporelles de l'évolution globale des grandeurs représentées sur la carte.

Le modèle prenant en compte de nombreux paramètres, le champ libre de l'utilisateur a été limité pour aller à l'essentiel. L'intérêt est que celui-ci se rende compte des conséquences de ses différentes décisions. Dans cette démarche, le paramètre le plus important est la trajectoire climatique, paramétrée via la sélection d'un des

scénarios développés par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC).

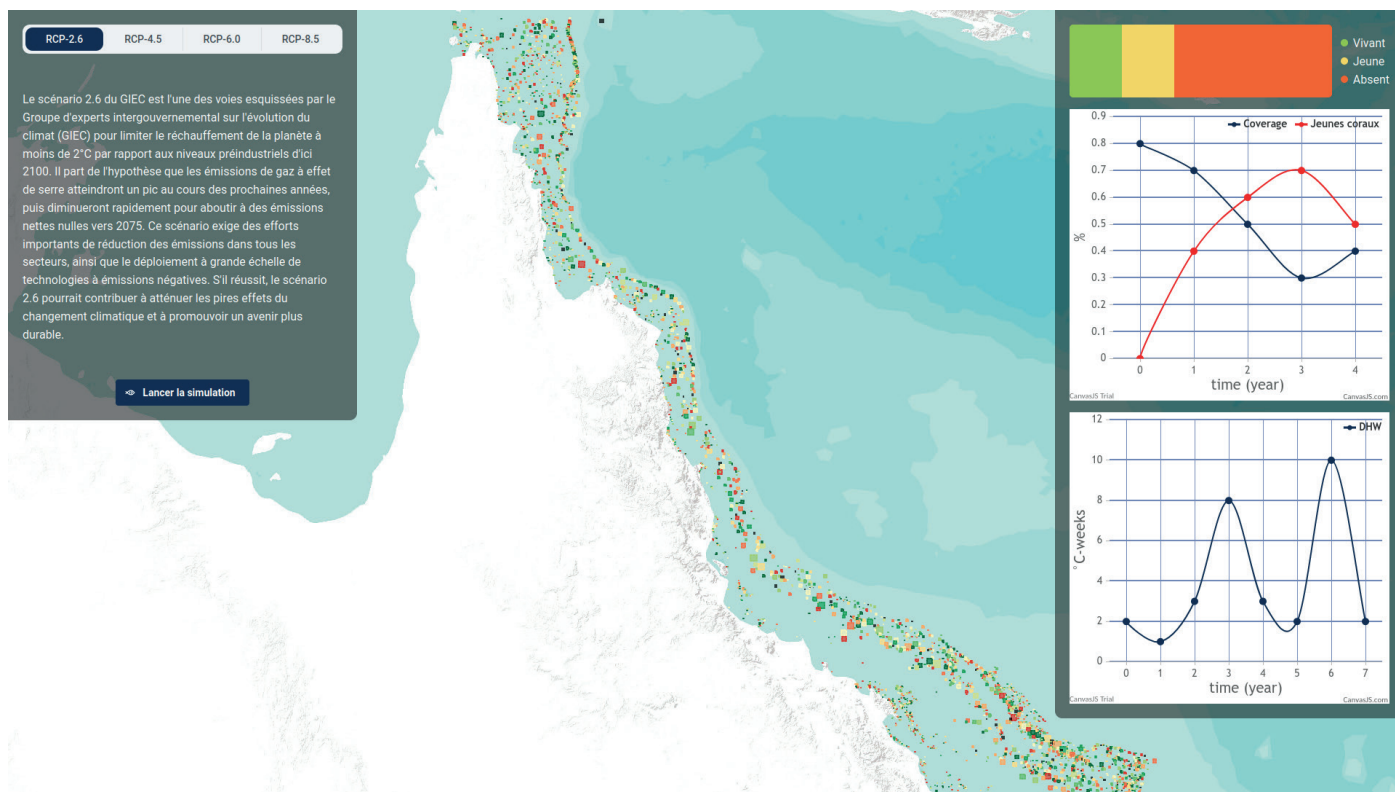
Le scénario 2.6 fait l'hypothèse que les émissions de gaz à effet de serre atteignent un pic au cours des prochaines années, puis diminuent rapidement pour aboutir à des émissions nettes nulles vers 2075. Cela permet de limiter le réchauffement de la planète à moins de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici 2100. Ce scénario exige des efforts importants de réduction des émissions dans tous les secteurs. A l'opposé, le scénario 8.5, également connu sous le nom de scénario business-as-usual, suppose qu'aucune mesure significative n'est prise pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Ci-dessous un résultat de simulation intermédiaire rend compte de la proportion de récifs couverts par des coraux selon ces deux scénarios :



Sur l'interface, la santé des récifs coraliens est caractérisée par la proportion de couverture, ainsi qu'un indice de mortalité des coraux : proportion à chaque incrément temporel du pourcentage de coraux morts par blanchissement depuis l'incrément précédent.

Les simulations sont faites avec un pas de temps de 6 mois. Le modèle est calibré sur les données 2008-2022 et fait des prédictions jusqu'en 2050. Voici ci-dessous un exemple du rendu affiché par l'interface.



Enjeux : guider et informer les décisions politiques

Un modèle n'est pas une solution. C'est un outil qui permet de modéliser les conséquences des scénarios prévus pour l'avenir. S'il est critique de pouvoir envisager le futur le plus précisément et certainement possible, c'est bien par des choix personnels et politiques que nous pouvons aujourd'hui agir pour protéger la planète et les coraux.

pour mettre en place d'éventuelles solutions techniques temporaires, et mesurer l'impact de des modes de vie. Quoi qu'il en soit, le défi de notre génération est bien une restructuration sociale, écologique et économique de la société.

Ce modèle peut permettre d'envisager l'effet de nos décisions à l'avenir afin d'éclairer nos choix. La quantification de la réponse environnementale à nos efforts est un indicateur nécessaire



"Coraux, micro-algues et microbione", Impression, élèves des Mines, Dezipner Numérique, 2023

Coraux, micro-algues et microbiomes

Des équilibres à protéger

Les coraux vivent dans des eaux tropicales en symbiose avec une algue unicellulaire appelée zooxanthelle, de la famille des Symbiodinium. Celle-ci apporte par photosynthèse des sucres simples et de l'oxygène nécessaires à la survie des coraux. Réciproquement, le corail fournit à l'algue des nutriments et du dioxyde de carbone permettant la photosynthèse, en plus d'un abri et d'une exposition lumineuse suffisante. La symbiose corail-zooxanthelle résulte de la capture puis de l'incorporation des algues photosynthétiques par l'édifice corallien. Selon certains scientifiques, la zooxanthelle possède certaines particularités génétiques, permettant un meilleur établissement et maintien de la symbiose comparativement à d'autres algues.

L'augmentation de la température de l'eau de mer due au changement climatique conduit à un phénomène nommé blanchissement, causé par l'expulsion des micro-algues dont l'absence révèle le squelette blanc du corail. La

Micro-algues thermorésistantes

Afin d'endiguer l'importante mortalité des récifs coralliens du monde entier du fait de vagues de chaleur marine de plus en plus fréquentes, des expériences visant à étudier et améliorer la résistance thermique des micro-algues sont en cours. Un groupe de chercheurs australiens a ainsi mené une expérience visant à améliorer la tolérance des coraux au blanchissement

rupture de la symbiose algue-corail est attribuée à la rétention de nutriments par les algues afin de maintenir leur croissance, ainsi qu'à la production en excès de dérivés réactifs de l'oxygène (DRO) nuisibles aux coraux. Ces derniers cessent alors d'accueillir les algues en les expulsant, ce qui a pour effet de les affaiblir et de révéler les pigments de leur squelette, les rendant blancs (mais certains peuvent être bleus, jaunes ou roses).

Les coraux établissent également une relation avec un autre type d'organisme : les bactéries, constituant le microbiome. Les interactions avec les communautés bactériennes peuvent être bénéfiques ou néfastes pour le corail. Les mécanismes en jeu dans ces échanges sont complexes et encore mal compris. Il est certain en revanche que la présence d'un microbiome en bonne santé est nécessaire à la vie des coraux - comme à celle de tout être vivant, humains compris - et que les équilibres constitués sont fragiles.

via l'amélioration des capacités d'adaptations des micro-algues symbiotiques. Ils ont cultivé en laboratoire 10 types de micro-algues présentes dans les coraux à des températures élevées (31°C) pendant quatre ans, en laboratoire. L'objectif était de déterminer s'il était possible d'augmenter la tolérance thermique de ces algues, dans le but de les réintroduire ensuite dans les

larves de corail hôtes afin d'endiguer le phénomène de blanchissement. Les dix souches de micro-algues ayant été ainsi confrontées à des températures élevées ont toutes présenté une tolérance thermique accrue. Lorsque les souches ont été réintroduites sur les coraux hôtes, trois des dix micro-algues ayant subi une hausse de température ont présenté des niveaux plus faibles de sécrétion de DRO. Cela prouve qu'il est possible de sélectionner des coraux présentant une meilleure résistance aux variations climatiques, plus résilients donc aux phénomènes de blanchissement.

Sur la base de l'expérience présentée ci-dessus, il serait donc possible de sélectionner et de propager sélectivement des micro-algues thermorésistantes. Malgré des résultats prometteurs, cette solution présente quelques limites. Tout d'abord, l'expérience n'a testé la tolérance aux fortes températures que d'un seul type de microalgues présent dans les coraux. D'autres types de microalgues pourraient jouer un rôle important dans la biologie des coraux et leurs réponses au stress environnemental. Il est également nécessaire de valider la stratégie sur plusieurs espèces de coraux. Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour déterminer si cette solution peut être appliquée à un plus grand nombre d'espèces.

D'autre part, l'environnement de laboratoire peut ne pas représenter fidèlement les conditions complexes et diverses que l'on trouve dans les écosystèmes coralliens naturels. Des tests

et un suivi in situ sont nécessaires pour s'assurer que les nouvelles souches de microalgues n'ont pas d'effets négatifs imprévus sur la santé des coraux, sur l'écosystème au sens large et qu'elles sont bien acceptées par les coraux (on ne peut pas contraindre un corail à accueillir un type de micro-algue plutôt qu'une autre).

Enfin, si l'approche n'implique pas de modification génétique, elle suppose néanmoins la culture et la sélection en laboratoire de souches de microalgues, ce qui soulève des problèmes économiques, logistiques et éthiques pour une mise en œuvre à grande échelle. Dans l'ensemble, si les résultats de l'étude sont prometteurs, des recherches et des tests supplémentaires sont nécessaires pour comprendre pleinement les limites et les implications potentielles de cette solution pour la conservation des récifs coralliens. Sur le plan financier en particulier, la maîtrise de cette technique dépend aussi fortement d'investissements dédiés à la recherche sur les coraux. L'Australie est le leader dans l'étude et la protection de la vie marine et dispose de ressources conséquentes, notamment à travers son programme Reef Restoration and Adaptation Program (RRAP). Elle a pour projet d'investir plusieurs centaines de millions d'euros dans la protection de la grande barrière de corail entre les années 2014 et 2030. Il paraît cependant difficile d'envisager que des pays en développement ayant de grandes surfaces de récifs à protéger puissent faire de même.

Microbiome

La symbiose entre le corail et les micro-algues ne suffit pas à expliquer la résistance de certains coraux aux

changements de leur environnement. Il faut aussi considérer le microbiome du corail, une collection d'innombrables

micro-organismes qui interagissent avec lui. Ainsi l'ensemble corail/microalgue/microbiome peut être considéré comme un supra-organisme : on parle d'holobionte.

Pour tirer profit de ce troisième acteur, les scientifiques cherchent à sélectionner des microbiomes particuliers qui permettraient aux coraux de mieux résister aux différentes menaces auxquelles ils font face : vagues de chaleur, mais aussi acidification des océans, attaque d'agents pathogènes... Il s'agirait d'identifier des micro-organismes potentiellement bénéfiques pour les coraux (pBMC en anglais) puis de les inoculer de manière préventive (avant un possible blanchissement) ou curative (sur des coraux blanchis). Ces techniques, rassemblées sous le terme générique de probiotiques, sont déjà employées dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique pour reconstituer la flore intestinale des êtres humains.

Plusieurs expériences concernant les coraux ont déjà été réalisées en laboratoire. Les protocoles ne sont pas standardisés, mais une expérience type commence par le prélèvement et l'isolement d'un microbiome provenant d'un corail (en milieu naturel) ayant particulièrement résisté à un stress extérieur. Le microbiome est ensuite analysé en laboratoire et chaque espèce de micro-organisme est isolée et testée afin de déterminer son potentiel en tant que pBMC et ses propriétés bénéfiques. Une fois les analyses terminées, on recrée un microbiome constitué des éléments les plus résistants et on l'inocule auprès d'un corail en aquarium. Enfin, on soumet ce dernier à une augmentation de température ou à l'action d'un pathogène pour voir si le nouveau microbiome permet un taux de survie plus important. Cependant le microbiome présent sur les coraux

variant selon l'espèce corallienne, voire les individus ou l'âge du corail, il n'est donc pas assuré que ceux sélectionnés en laboratoire puissent se développer et protéger durablement les récifs.

Dans tous les cas, la question du passage à l'échelle se pose : comment inoculer les microbiomes résistants à l'échelle d'un récif et dans les conditions naturelles du milieu marin ? De la flottille de navires scientifiques dédiés, à des grandes campagnes d'inoculation manuelle, un grand volet de développement technique du passage à l'échelle reste nécessaire.

Il est important de comprendre que cette solution se base sur l'introduction de nouveaux micro-organismes dans un écosystème complexe, basé sur des équilibres fragiles que nous connaissons peu. Même si le microbiome introduit est identifié comme bénéfique pour les coraux, l'influence des mêmes micro-organismes sur le reste de l'écosystème est inconnue, et potentiellement destructive. De plus, compte tenu de la compréhension encore trop incomplète du rôle de ces micro-organismes, les recherches se concentrent actuellement sur l'adaptation simultanée des coraux et des micro-organismes à leur environnement commun. Cette solution nécessite donc de plus amples recherches avant de pouvoir être implémenter.



"Et pour quelques espèces de plus...", Kakemono, élèves des Mines, Nicolas Brunet (6.5), Dezipner Numérique, 2023

Et pour quelques espèces de plus ...

Pourrait-on renforcer les coraux par hybridation ?

Le constat est énoncé : l'augmentation de la température des eaux provoque un blanchissement des coraux à grande échelle. Pourtant, dans certaines zones subissant de larges écarts de température, des coraux étonnamment résistants ont été découverts, comme *Stylophora pistillata*, *Pocillopora damicornis*, ou *Favia fava*. Dans la mer Rouge, certains coraux sont capables de tolérer des variations de températures extrêmes (+ 6°C pendant 4 semaines). De la même manière, des populations de coraux dans le golfe Persique ne commencent à blanchir qu'à

des températures supérieures à 34-35 °C. Ces coraux, dits "thermo-tolérants", attirent de plus en plus l'attention des scientifiques. Des études ont permis de montrer qu'une partie de ces adaptations physiologiques et génétiques étaient transmises aux larves des coraux et qu'elles pourraient donc s'inscrire dans leur patrimoine génétique. Cette transmission à la descendance ouvre la possibilité d'accompagner l'évolution des coraux pour les rendre résistants aux variations de température que connaîtra le 21^e siècle.

L'hybridation

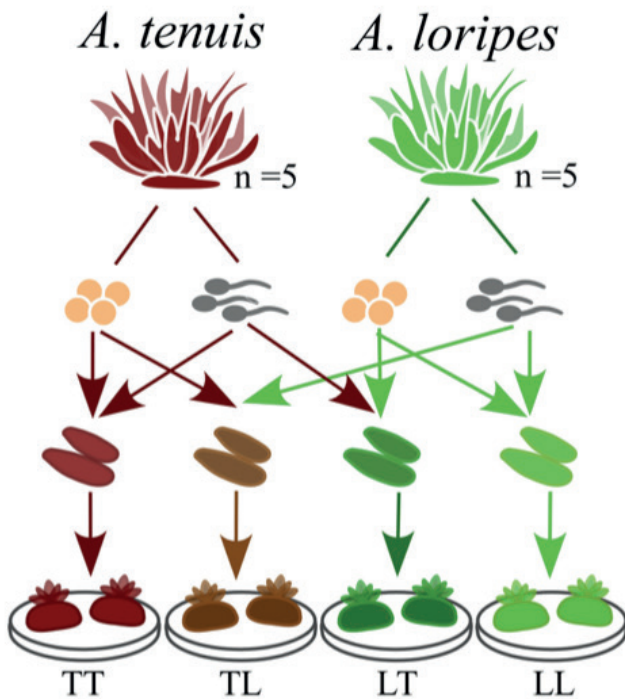
L'hybridation est un phénomène naturel pour de nombreuses espèces qui consiste à obtenir, à partir de 2 parents d'espèces différentes, un individu d'une nouvelle espèce dite "hybride". L'observation de ce phénomène a permis de grandes avancées dans l'agriculture notamment, des caractéristiques spécifiques (ou phénotypes) ont ainsi pu être sélectionnés pour que les blés cultivés soient plus résistants aux insectes par exemple.

Dans le cas des coraux, cette hybridation naturelle est très rare. En laboratoire, les scientifiques cherchent donc à hybrider différentes espèces en vue d'en faire des "super-coraux" dont une des caractéristiques principales serait la thermorésistance. Pour ce faire, deux concepts d'hybridation doivent être considérés: la vigueur hybride et la

sélection de gènes.

De la même manière que le croisement de la jument et de l'âne donne une espèce plus robuste, la mule, croiser deux espèces de coraux donne des individus plus susceptibles de résister à des températures extrêmes. Ce phénomène est appelé vigueur hybride. On peut ainsi croiser de nombreuses espèces et sélectionner parmi les individus ceux présentant la plus grande résistance à la chaleur. Des expériences d'hybridation ont été faites avec les espèces *A. tenuis* et *A. loripes*, et les hybrides obtenus (TL et LT sur le schéma ci-contre) ont présenté une meilleure résistance à la chaleur que les espèces d'origine.

La vigueur hybride s'applique à des espèces du même écosystème, indépendamment de leurs caractéristiques.



Or, nous avons vu plus haut qu'il existe certaines espèces thermorésistantes possédant des gènes qui peuvent être ciblés. Il peut donc être envisageable de les sélectionner en hybridant ces espèces résistantes avec les espèces autochtones des écosystèmes aujourd'hui en danger, puis en effectuant une sélection génomique des espèces découlant de ce croisement. Cette technique de sélection de gène présente cependant des limites qui seront présentées ci-après.

Les défis du passage à l'échelle

La cryopréservation

La majorité des espèces coralliennes possèdent une période de reproduction de quelques jours par an. Pendant celle-ci, les gamètes, cellules reproductives mâles et femelles, sont relâchés dans l'environnement et restent viables quelques heures au maximum. Il paraît donc compliqué d'hybrider 2 espèces ayant des périodes de reproduction différentes. Cependant, de récents progrès en cryopréservation rendent possible la congélation, le stockage, le transport et la décongélation de sperme viable. Des scientifiques ont ainsi prouvé qu'il est possible de fertiliser des gamètes femelles fraîchement collectés dans la barrière de coraux, avec des gamètes mâles qui ont été cryopréservés.

La cryopréservation permet ainsi l'hybridation d'espèces provenant de zones géographiques différentes, en plus de permettre l'hybridation entre des espèces qui ne se reproduisent normalement pas aux mêmes périodes. Elle est aussi envisagée comme une solution de conservation à long-terme du patrimoine génétique corallien¹. Aujourd'hui, les techniques de cryopréservation sont assez bien maîtrisées en laboratoire. Les recherches actuelles consistent à trouver les meilleurs agents de cryopréservation pour chaque espèce de coraux, et à augmenter les taux de fertilisation, qui sont réduits par la conservation frigorifiée.

Quelle fertilité pour les hybrides ?

Bien que l'hybridation soit un outil potentiel pour améliorer les résultats de la restauration, elle est souvent écartée dans ces initiatives. La stérilité

des hybrides coralliens peut varier en fonction de différents facteurs, tels que les espèces de coraux impliquées, la proximité génétique de celles-ci, les

conditions environnementales, les incompatibilités chromosomiques ou la présence d'anomalies génétiques.

Ainsi, les hybrides ont d'autant plus de chances d'être fertiles que leurs parents sont proches génétiquement (espèces "proches"). Les coraux appartenant à des familles différentes, n'ont ainsi aucune chance de produire une larve fertile, même s'ils sont capables de s'hybrider. Une préoccupation principale est donc la possibilité de dépression reproductive dans les générations

Une efficacité limitée

La recherche sur l'hybridation est encore relativement récente. Il faudrait attendre encore plusieurs années pour obtenir des chiffres avérés sur l'efficacité de ces techniques d'hybridation. En effet, un corail a une espérance de vie d'environ 200 ans et il faut environ 5 années avant de pouvoir observer son phénotype. Des études récentes commencent à donner quelques résultats sur des expériences de vigueur hybride principalement.

Les taux de fécondation entre gamètes provenant de deux espèces différentes de coraux sont extrêmement variables et dépendent notamment de proximités géographiques et génétiques entre espèces. Pour une paire d'espèces relativement proches, ce taux de fécondation peut atteindre les 80%, tandis que pour d'autres il ne dépasse pas les 3%. Ces chiffres mettent en avant la nécessité de trouver des paires d'espèces compatibles et pour lesquelles la fécondation est favorisée. Sur ces fécondations réussies, 20% des œufs mourront rapidement, puis sur les larves survivantes, on estime à 30% le nombre qui arrivera à se fixer sur un substrat puis devenir

suivantes. La plupart des exemples de ce phénomène sont associés au mélange de populations ou d'espèces géographiquement éloignées. De plus, la perte de diversité par la perte d'une partie du génome de l'espèce parentale est aussi inquiétante. Il est donc essentiel de comprendre les implications potentielles de la production de ces hybrides avant de chercher à les utiliser pour restaurer les récifs coralliens endommagés.

un polype. Finalement, 70% de ces polypes n'arriveront pas à se développer en une colonie d'au moins une dizaine de polypes. Ces chiffres montrent qu'il faudra réaliser en laboratoire une quantité extrêmement importante de fécondations pour espérer créer et implanter avec succès un corail hybride. De plus, même si l'hybridation s'avère réussie, il n'est pas possible d'estimer avec certitude quelle proportion de coraux posséderont la caractéristique recherchée.

Pour finir, il faut éviter le phénomène de perte de diversité dans l'écosystème d'une barrière de corail. En effet, si celui-ci est composé en grande majorité d'une espèce présentant les mêmes faiblesses face à des agressions extérieures, cela aurait des conséquences catastrophiques. Il apparaît donc nécessaire de diversifier et multiplier les espèces hybrides implantées. Par conséquent, il faudrait des années de recherches afin de trouver les meilleures combinaisons d'espèces afin de créer un écosystème résilient.

Limites génétiques et impacts sur la biodiversité

Imaginons que des solutions d'ingénieries soient développées pour permettre une hybridation à l'échelle des coraux. Quelles seraient les limites de cette intervention humaine dans l'écosystème corallien ?

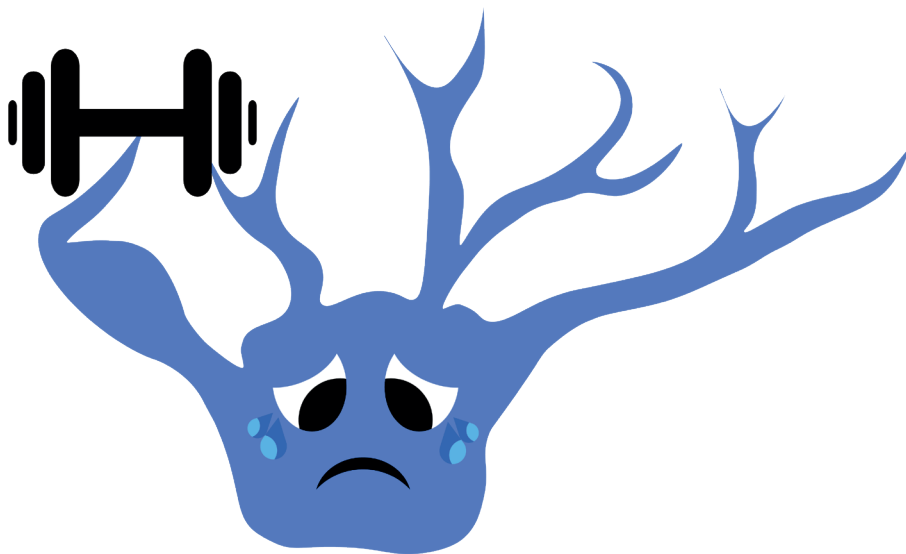
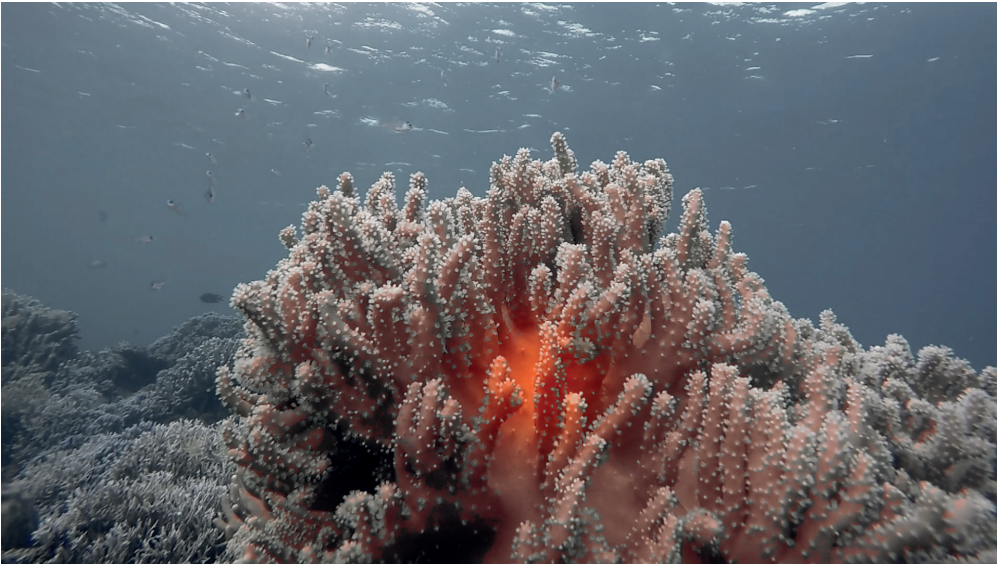
Tout d'abord, les coraux sont environ 2 fois plus vieux que les dinosaures et ont donc toujours évolué (via des mécanismes de sélection naturelle) en parallèle des écosystèmes dans lesquels ils vivent. C'est l'accélération des modifications des écosystèmes (ici les variations de température de l'eau qui passent de 1° par millions d'années à 1.5° en 50 ans) dûes aux activités anthropiques qui modifient les temps caractéristiques d'évolution. Ainsi de nombreuses espèces n'évoluent plus assez vite pour assurer la résilience naturelle des écosystèmes (capacité à passer outre les perturbations), c'est le cas notamment des coraux dont la disparition pourrait totalement dérégler les écosystèmes lagunaires. De la même manière, insérer une nouvelle espèce, aussi thermo-résistante soit-elle, crée de l'aléa dans un écosystème naturellement auto-régulé et pourrait entraîner d'autres problématiques comme des envahissements et des pertes de biodiversité globale comme on a déjà pu l'observer avec les espèces invasives (comme les renouées du Japon). Travailler uniquement sur les 3 à 10 espèces thermo-résistantes c'est ignorer plus de 90% de la diversité des écosystèmes lagunaires.

De plus, si l'on pousse le parallèle de cette solution avec celles déjà mises en place dans le monde agricole et sylvicole, une autre limite apparaît : celle du goulot génétique. C'est le même problème que l'on rencontre avec les

OGM : à savoir que les manipulations humaines conduisent à une sélection trop intense sans place pour l'aléatoire normalement apportée par la reproduction sexuée. Ainsi même si le problème de la thermosensibilité est réglé, la perte de diversité génétique pourrait exposer les nouvelles populations de coraux à des infections (bactériennes ou virales) qui décimeraient les individus (mildiou de la vigne).

Pour conclure, cette solution semble théoriquement viable et se base sur des technologies maîtrisées. Cependant, de nombreuses problématiques de mise à l'échelle pour les écosystèmes coralliens se posent encore (défis techniques) et doivent être résolus en prenant garde aux risques de perte de biodiversité et de convergence génétique.

Notre visuel vous présente un constat mitigé: un très grand nombre de gamètes, rouges et bleues, ne permet d'obtenir par hybridation qu'un très petit nombre d'hybrides à la fois fertiles



"Un (r)échauffement pour les coraux ?", Vidéo (48s), élèves des Mines, H2M Video, 2023. https://youtu.be/ArMsp_jCKL8

Un (r)échauffement pour les coraux ?

Afin d'améliorer la résistance des coraux à la hausse de température des milieux marins et ainsi prévenir leur blanchissement, leur préconditionnement thermique pourrait être une technique prometteuse.

Ce préconditionnement consiste à rendre certaines espèces de coraux résistantes au stress thermique en les entraînant à le supporter. Le principe est de chauffer de manière contrôlée et progressive l'environnement dans lequel les coraux évoluent afin de les habituer à subir les futures variations de température liées au dérèglement

climatique et ainsi créer une résistance au stress thermique.

Cette technique encore peu mature soulève des enjeux : Quelles en sont les limites ? Est-elle applicable à toutes les espèces de coraux ? Est-elle déployable à grande échelle ?

Toutes ces interrogations sont autant de difficultés à surmonter pour mettre en œuvre cette solution de laboratoire à grande échelle. Nous verrons dans le détail l'état actuel des connaissances et les limites intrinsèques de ces solutions.

Résultat scientifique de la preuve de concept

Le phénomène de résistance thermique après un préconditionnement a déjà été observé à l'état naturel. En 1998, la grande barrière de corail a connu une vague de chaleur inédite provoquant la mort d'une part importante de la population de corail. Lors d'une seconde vague de chaleur en 2002, pendant laquelle les radiations étaient pourtant plus intenses, il a été montré que les espèces prédominantes (*Acropora*, *Pocillopora* et *Porites*) ont subi un taux de blanchissement plus faible qu'en 1998 (Maynard et al., 2008).

Depuis le début du XXI^e siècle, de multiples études scientifiques se sont penchées sur ce phénomène afin d'en étudier les conditions expérimentales optimales et de comprendre les processus sous-jacents d'une telle résilience.

Une étude scientifique (A. J. Bellantuono et al. 2021) a mis en

évidence l'efficacité du préconditionnement thermique sur l'espèce de corail *Acropora Millepora* endémique de l'océan Indien. Les chercheurs ont soumis des individus de cette espèce à un stress thermique de 28°C pendant 10 jours. Les individus préconditionnés, ainsi que les individus n'ayant pas subi d'entraînement thermique, ont ensuite été placés dans un environnement à 31°C, soit la température à partir de laquelle un blanchissement est observé pour les coraux de cette espèce. L'étude a montré que la symbiose des coraux préconditionnés résistait beaucoup mieux à la vague de chaleur après 10 jours d'exposition, la densité des symbiotes étant 3 à 4 fois supérieure que chez les individus non-préconditionnés. Les chercheurs ont de plus démontré que cette meilleure résilience ne pouvait pas s'expliquer par une modification de la composition du type de microalgue mais

bien par une acclimatation du corail lui-même.

Des études plus récentes portant cette fois-ci sur l'espèce de *Pocillopora acuta* et réalisées par des chercheurs de Hawaï (E. Majerova et al., 2021) (E. Majerova et al., 2022) soutiennent la thèse d'une acclimatation du corail et non des microalgues, en proposant une explication épigénétique à cette adaptation. Les chercheurs ont observé une augmentation de l'expression génétique pa-BI-1 après un préconditionnement thermique et ont mis en évidence que cette augmentation était corrélée avec l'augmentation de l'enzyme glutathion réductase chez les individus préconditionnés. Cette enzyme est essentielle pour lutter contre le stress oxydant provoqué par les microalgues lors d'une vague de chaleur. Ainsi, il a été démontré qu'une adaptation épigénétique avait lieu lors du préconditionnement thermique pour lutter contre l'oxydation du corail, responsable de son

Mise en application

Comment exploiter cette preuve de concept afin d'améliorer la thermorésistance des coraux ? Notre réflexion porte sur les limites de cette technologie et les difficultés à considérer lors de la conception d'une solution déployable.

Nous considérons tout d'abord la possibilité de développer des échantillons de coraux thermorésistants en aquarium puis de les fixer sur des récifs coralliens. Passons en revue les différentes étapes du protocole et les enjeux auxquels le cahier des charges doit répondre :

1. Choix des espèces : le déploiement de cette solution implique un travail de sélection optimale des coraux. La preuve de concept témoigne bien des temps longs

blanchissement.

La question de la transmission intergénérationnelle de cette résilience thermique d'origine épigénétique s'est alors posée dans la communauté scientifique. Une étude (H. M. Putnam et al., 2015) vient répondre en partie à cette problématique en montrant que les adaptations thermiques observées chez des individus parents préconditionnés se retrouvent dans leurs descendances. Mais il est aussi important de souligner que cette étude démontre que les descendants des individus préconditionnés sont moins adaptés à des conditions d'environnement normales.

Néanmoins, les mécanismes biologiques causés par un préconditionnement thermique restent majoritairement peu connus et les spécificités de chaque espèce de corail demande l'élaboration d'un protocole laborieux de préconditionnement propre à chaque espèce.

nécessaires pour trouver le bon protocole. Il est nécessaire d'être sélectif dans le choix des coraux à préserver, en privilégiant les coraux les plus sujets au blanchissement ou ayant une rapide vitesse de propagation ...

2. Réchauffement des eaux en aquarium : tout d'abord, une réflexion doit être menée sur l'origine de la source d'énergie pour réchauffer l'eau afin de ne pas augmenter les émissions. Une potentielle solution serait d'utiliser des déperditions de chaleur d'autres systèmes. Cette chaleur doit être contrôlable afin d'adapter au mieux le modèle. Néanmoins, une des limites concerne le protocole pour créer de

la thermorésistance : un protocole est-il facilement duplicable pour une autre espèce ? Il y a un enjeu à ce que cette solution "pansement" puisse se déployer rapidement.

3. Fixation des coraux thermorésistants dans les récifs : Quels sont les moyens pour déployer cela ? Les coraux ont une longue durée de vie, il serait donc possible de repeupler les récifs grâce à leur développement en polypes. Mais ne perturbe-t-on pas alors la structure 3D des récifs ?
4. Et ensuite ? Une des limites concerne l'incertitude de la durée de cette thermorésistance. Les travaux de recherche actuels ne nous permettent pas de dire si cet effet généré grâce au préconditionnement est définitif. De nombreuses incertitudes persistent : Quel sera l'impact sur la nouvelle génération ? Ce pré-conditionnement ne provoquerait-il pas une perte d'adaptabilité aux températures froides ?

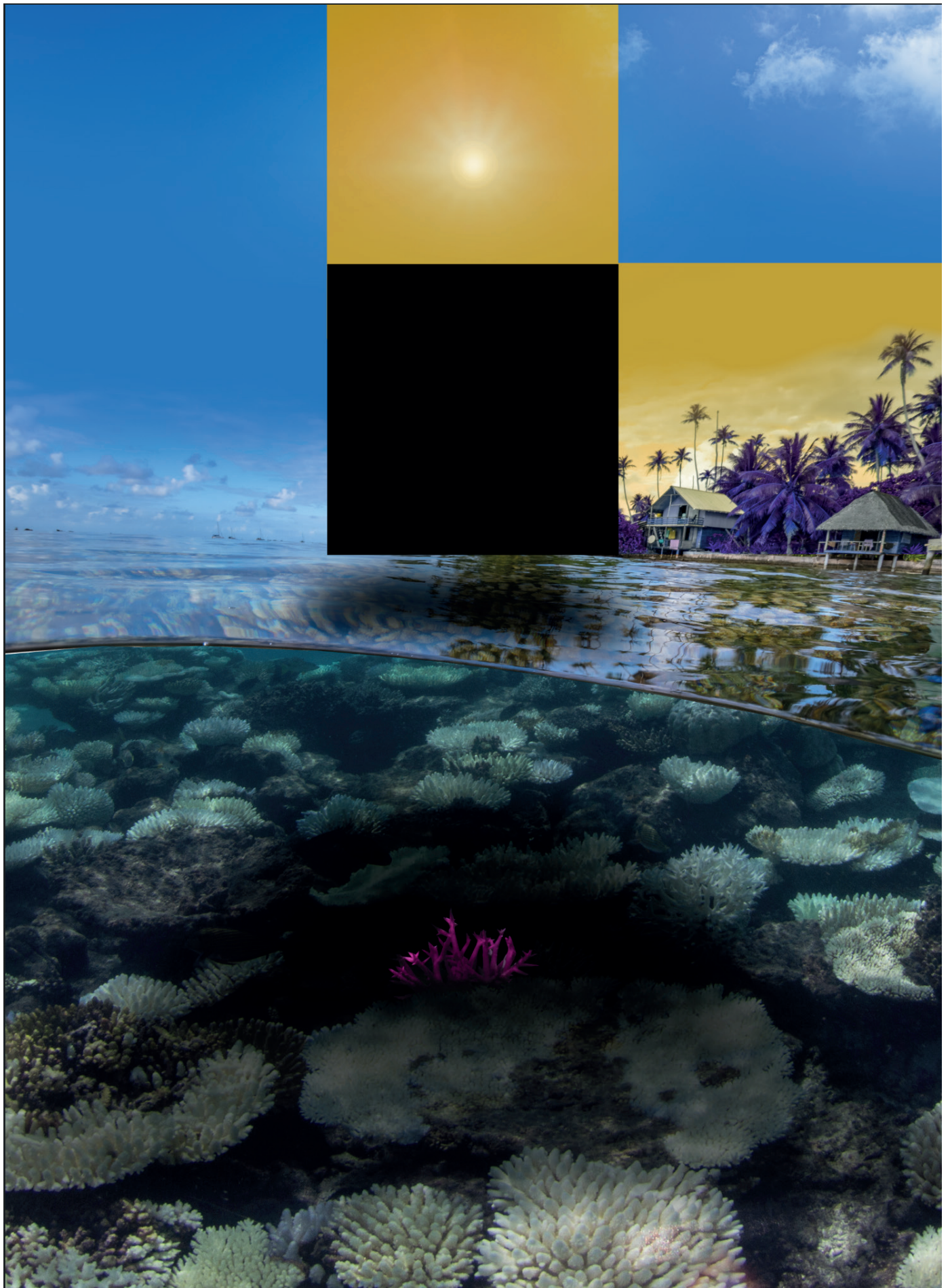
La proposition qui découle de la preuve de concept se heurte cependant au défi de son déploiement à plus grande échelle. Dans le cadre d'un entraînement en laboratoire dans un aquarium se présente en effet la limite de la quantité et de la variété des coraux pouvant être préconditionnés. Dès lors que les dimensions ex situ (hors des récifs coralliens) ne permettent plus le traitement de la quantité souhaitée d'individus, un

changement d'environnement de travail devient nécessaire.

On pourrait penser à directement conditionner les coraux dans leur environnement naturel. Bien que cela présente l'avantage de résoudre les problématiques de transport, de re fixation des coraux, et de pouvoir cibler une plus grande diversité d'espèces, cette méthode soulève certaines questions éthiques et pratiques qui la rendent difficile à concevoir. Augmenter la température de l'eau marine est contre-intuitif au vu des enjeux climatiques. De plus, à la différence d'un laboratoire dans lequel l'ensemble des paramètres et des conséquences est contrôlable avec précision, le déploiement en mer présente des incertitudes sur sa faisabilité et ses potentiels effets indésirables. Peut-on vraiment contenir localement la variation de température malgré les courants marins ? De plus, la réaction des espèces dans l'écosystème aux alentours des récifs coralliens est difficilement prévisible. Se pose enfin la question de l'origine de la source d'énergie nécessaire, qui dépend notamment de la localisation du récif.

In fine, cette solution est encore trop peu mature alors qu'il faudrait qu'elle soit déployée rapidement. De plus, elle ne sera déployable qu'à très petite échelle. Le problème ne pourra être résolu qu'en combinant plusieurs solutions mais surtout en accélérant la décarbonation de l'activité économique et en préservant au mieux nos territoires marins.

La vidéo présentée dans l'exposition insiste sur cette notion d'entraînement des coraux en utilisant un parallèle fort avec le sport qui a pour but de surprendre le spectateur. Le rythme soutenu et dynamique reflète l'intensification des vagues de chaleur liée au changement climatique qui vient menacer la résilience des coraux. Le rythme continue de s'accélérer et les récifs coralliens se détériorent encore. Sera-t-il possible de ralentir cette crise ? Sauverons-nous les coraux du réchauffement des eaux ?



"Une vie plus douce à l'ombre des panneaux ?", élèves des Mines, Kakémono, Nicolas Brunet (6.5), Dezipner Numérique, 2023

Une vie plus douce à l'ombre des panneaux ?

Mise en contexte

La survie du corail est dépendante de sa symbiose avec une microalgue appelée zooxanthelle. Dans un environnement de température anormalement élevée, le système photosynthétique des zooxanthelles s'emballé sous l'abondante irradiation lumineuse. Des espèces réactives de l'oxygène sont produites et deviennent source d'un stress oxydatif dans les tissus des coraux. Ces derniers expulsent alors leurs microalgues pour protéger leurs tissus. Le phénomène de blanchissement

apparaît. Bien qu'initié par la température, ce mécanisme est décuplé par cette surabondance lumineuse temporaire.

Pour empêcher cette rupture symbiotique, une approche consiste à limiter l'exposition au soleil des coraux lors des épisodes de vagues de chaleur. En effet, les expérimentations ont montré qu'une réduction de l'exposition aux rayons solaires de 26 à 65% permet de préserver la quantité de microalgues dans les coraux.

Etat de l'art des techniques d'ombrage

Jusqu'ici, des approches variées ont été envisagées pour limiter l'exposition des coraux à la lumière. En 2019, le Reef Restoration and Adaptation Program, une collaboration d'experts australiens ayant pour but la préservation de la Grande Barrière de corail, a publié un rapport dans lequel il présente les différentes techniques de protection des récifs coralliens. En ce qui concerne les interventions basées sur l'ombrage, il distingue les méthodes suivantes :

- Cloud brightening et fogging : des particules d'eau de mer sont mises en suspension au-dessus de la surface pour créer des nuages ou du brouillard afin de limiter l'exposition des coraux au soleil.

- Films occultants : une bâche protectrice est placée au-dessus des coraux pour filtrer ou occulter les rayons lumineux.
- Microbulles : formation de microbulles en surface créant une couche occultante.
- Macro-algues : cultures de grandes algues au-dessus des coraux.

Excepté les bâches, actuellement en test, ces solutions sont en cours de développement et un déploiement n'est envisagé qu'à l'horizon de 2030. De plus, à l'exception du cloud brightening, ces méthodes sont très locales, et permettent d'intervenir sur des surfaces de l'ordre d'un hectare au maximum.

Modélisation de l'impact de l'ombrage sur le blanchissement des coraux

Une modélisation a été réalisée sur des données d'une parcelle de

la Grande Barrière de corail sur une décennie. Afin d'analyser l'impact de l'ensoleillement sur la température et le blanchissement des coraux, deux approches ont été développées :

- La première basée sur une modélisation physique.
- La suivante sur une modélisation statistique s'appuyant sur deux bases de données : la Global Coral-Bleaching Database (contenant entre autres la température et le pourcentage de blanchissement des coraux), et la National Solar Radiation Database (incluant le rayonnement solaire).

Si l'étude statistique n'a pas permis d'aboutir à des résultats concluants, l'approche physique permet de mettre en évidence que l'ombrage permet de baisser le taux de blanchissement des coraux à une petite échelle.

Ce modèle est basé sur le scénario du GIEC RCP 4.5¹ et fait usage de fogging sur une surface représentant 2% de la totalité de la Grande Barrière. Permettant de modéliser l'ombrage, celui-ci atteste d'une augmentation de la proportion de coraux (cf. figure 1). Ce comportement découle d'une baisse de la mortalité, étroitement liée à une baisse du blanchissement des coraux.

Hybridation des usages avec production photovoltaïque

En couplage des techniques actuelles d'ombrage, le photovoltaïque pourrait permettre d'exploiter les surfaces à protéger pour produire de l'électricité. Cette technologie a profité, ces dernières décennies, d'un véritable essor

technologique et industriel. Rien qu'en Europe, la puissance installée de panneaux photovoltaïques a été multipliée par 10 au cours de la dernière décennie. Néanmoins, plusieurs défis limitent encore le déploiement de cette énergie

¹ Dans le cadre du GIEC, les experts ont défini quatre profils représentatifs d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre (RCP, Representative Concentration Pathways) pour le XXI^e siècle et au-delà. Le scénario RCP 4.5 correspond à un scénario avec stabilisation des émissions avant la fin du XXI^e siècle à un niveau faible (2^e scénario le plus optimiste sur 4).

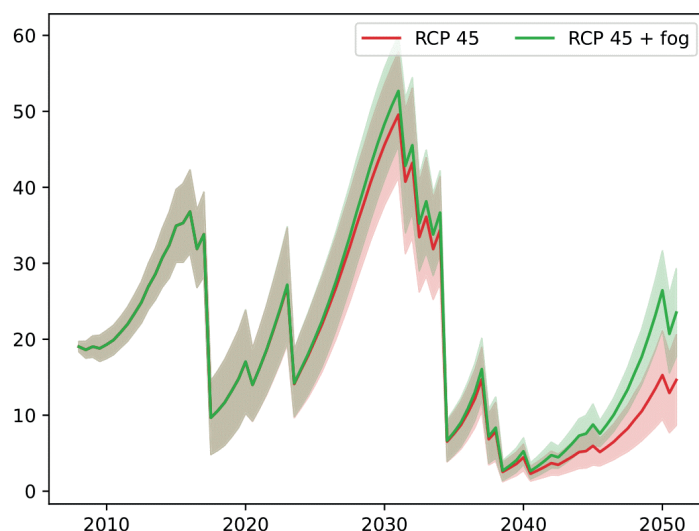


Figure 1. Evolution temporelle du nombre de coraux en fonction de deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 4.5 avec l'usage de fogging à 2% de la surface)

renouvelable dans le monde. En tête : la disponibilité des espaces appropriés à l'implantation de grands parcs photovoltaïques sans conflits d'usage.

Le photovoltaïque flottant (FPV) apparaît comme une solution pour répondre à cet enjeu. Il est déjà utilisé sur des étendues d'eau artificielles telles que des barrages hydroélectriques, des petits lacs ou des bassins de stockage des eaux usées. L'élan pris par le secteur au cours des dernières années a conduit à une capacité installée cumulée totale de FPV de 1,1 GW à la mi-2018 contre 132 MW en 2016.

Ces premiers systèmes ne sont toutefois pas adaptés aux environnements en eaux agitées, et ne peuvent donc pas être implantés en mer. Les nombreuses mégapoles situées en bord de mer, sujettes à une nécessité de décarbonation, ne pourront dès lors pas en bénéficier.

Plusieurs prototypes sont en développement afin de conquérir ces nouveaux espaces et répondre à ces enjeux (Trapani et Millar, 2013). L'utilisation de panneaux à couche mince flexibles (cf. figure 2) semble alors pertinente dans ce contexte. Leur "technology readiness level" compris entre 5 et 6 permettrait d'envisager leur déploiement d'ici quelques années seulement.

Par exemple, l'installation de telles technologies le long des côtes de la mer de corail à proximité de Cairns (Australie) ou Port Moresby (Papouasie) permettrait la protection de récifs coralliens pendant des épisodes de chaleur

extrême.

Notons cependant que, du fait des câbles électriques reliant ces panneaux à l'installation électrique sur terre, ces panneaux ne sont pas déplaçables. Bien que fournissant un ombrage moyen indispensable pour les coraux, ils ne permettent cependant pas de moduler l'intensité lumineuse selon les conditions météo. Une alternance de panneaux photovoltaïques (PV) et de bâches rétractables permettrait de réguler la luminosité tout en produisant de l'énergie (cf. figure 2).

Néanmoins, cette technologie est encore coûteuse. Un dispositif déployé sur un hectare conçu pour un taux d'ombrage de 30% et une puissance installée de 660 kW nécessiterait un investissement d'environ 1.2 millions d'euros, pour un coût de l'électricité produite de 0.14 €/kWh, soit 2 fois plus que les standards pour une production terrestre.

Une analyse de cycle de vie envisage des émissions de 250 tonnes de CO₂ pour un déploiement sur un hectare. Dans le même temps, le site de production permettrait de compenser les 240 000 tonnes rejetées pour la même production par les centrales à charbon, soit une réduction d'un facteur 100 des émissions par kWh. De tels systèmes apporteraient donc une réponse partielle aux enjeux de transition énergétique locaux. A titre d'exemple, les énergies fossiles sont encore à l'origine de 76% de l'électricité en Australie.

Ouverture

Ces systèmes soulèvent des questions qui ne sont pas à négliger. Si ces structures ont une durée de vie de 20 ans, leur recyclage constitue encore un défi

à relever. De plus, leur impact visuel important pourrait menacer les activités touristiques locales, déstabilisant fortement l'économie de populations

vivant majoritairement de ce secteur.

Enfin, ces technologies ne participent en aucun cas à l'adaptation des écosystèmes au changement climatique, et ne constituent qu'une solution d'ingénierie d'urgence, permettant de préserver une

petite partie des écosystèmes récifaux en attente de solutions plus durables.

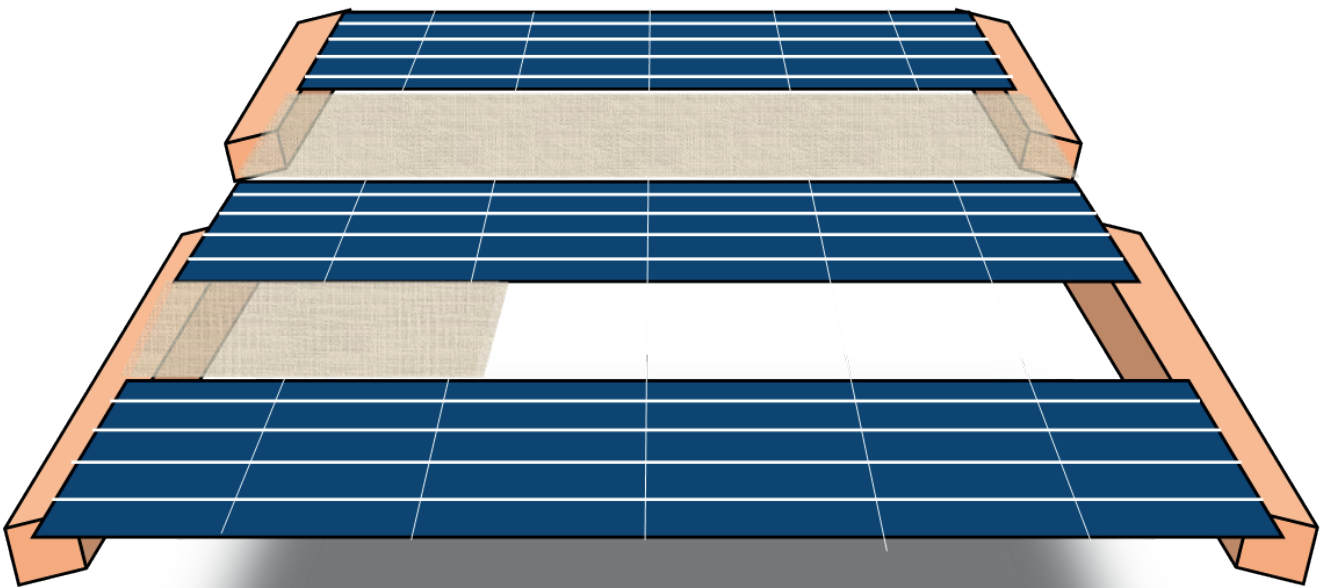
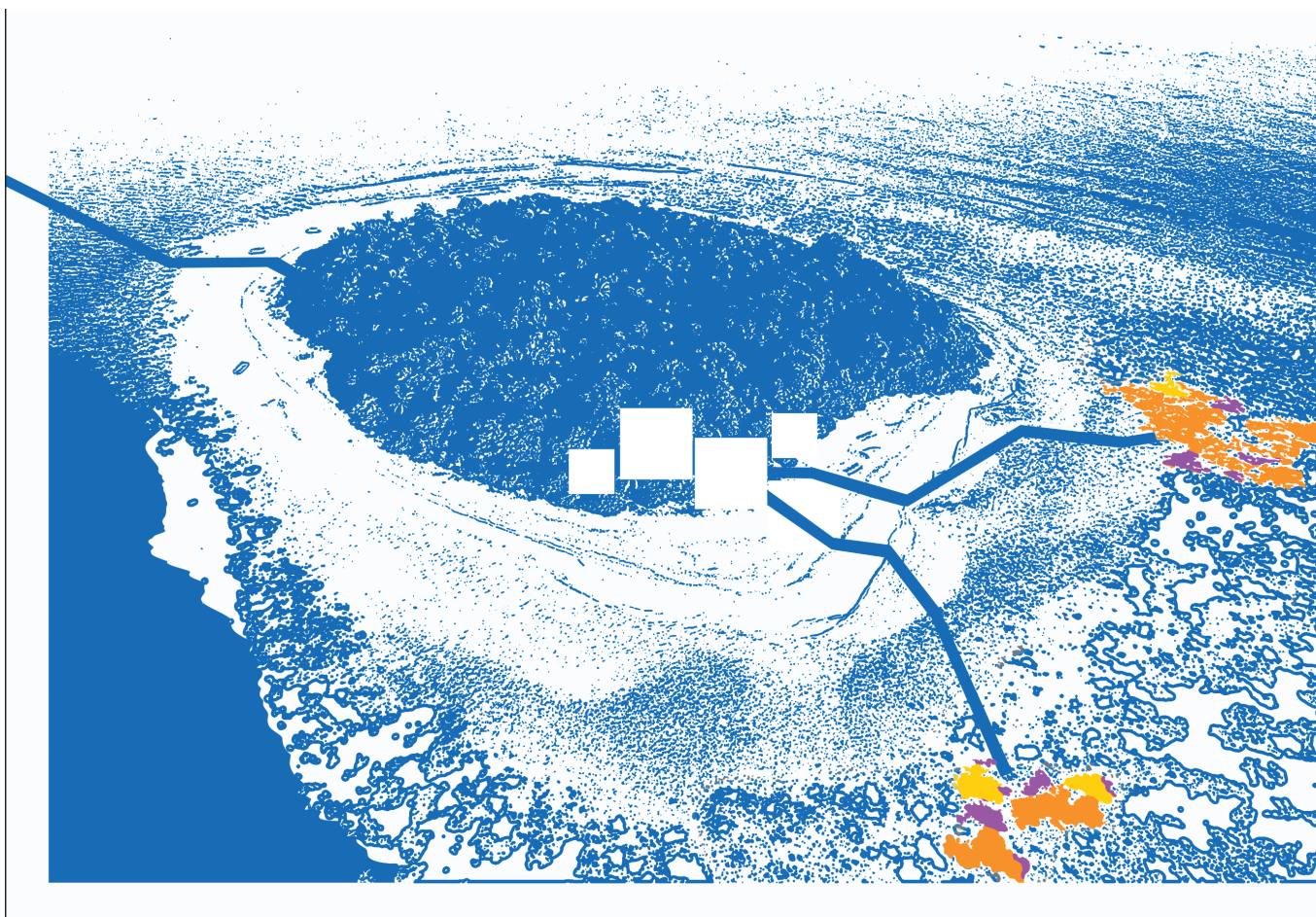


Figure 2. Représentation du dispositif proposé. En orange : bouées déformables, en jaune : bâches occultantes rétractables. A noter que le système de fixation aux fonds marins et les raccords électriques ne sont pas représentés.



"Une climatisation pour les coraux ?", Impression paysage, élèves des Mines, Nicolas Brunet (6.5), Dezipner Numérique, 2023

Une climatisation pour les coraux

Refroidissement des coraux par injection d'eau froide

Le refroidissement des récifs coralliens vise à limiter la disparition des coraux en luttant contre leur blanchissement. Le principe est simple : si le blanchissement des coraux est une conséquence d'une anomalie de température par rapport à la moyenne des températures estivales, pourquoi ne pas rafraîchir cette eau ? La question peut sembler naïve mais ce sont de grands enjeux techniques qui se cachent derrière en réalité. Si ça n'est évidemment pas une solution globale, capable de préserver les coraux à

grande échelle, cela reste une piste à explorer pour préserver certaines zones protégées et préserver une partie de la biodiversité pour les années à venir.

Pour ce faire, deux systèmes sont envisagés. Le premier consiste à réutiliser l'eau froide de rejet des systèmes de climatisation appelés SWAC. Le second est un système passif qui utilise la fraîcheur du sol pour refroidir l'eau au-dessus.

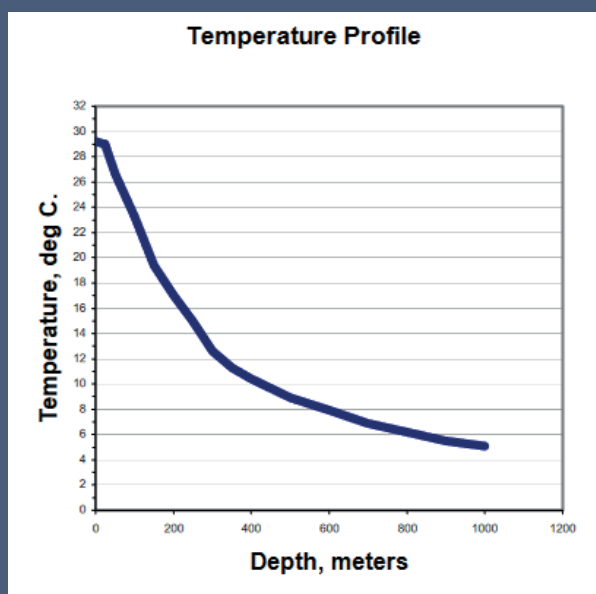
SeaWater Air Conditioning (SWAC)

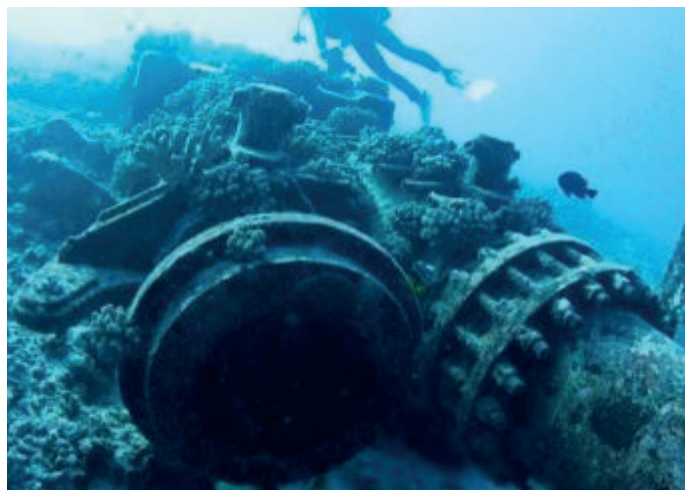
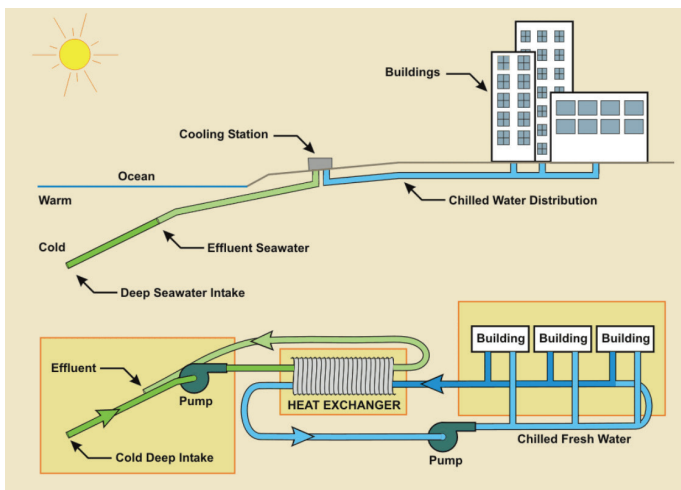
La climatisation à l'eau de mer (SWAC) est un système d'énergie alternative qui utilise l'eau froide des profondeurs de l'océan (et parfois d'un lac profond) pour produire de l'air conditionné. Dans certaines régions, il est possible de réduire ainsi considérablement l'énergie consommée par les systèmes de climatisation : le SWAC peut être un investissement rentable et intéressant.

Comme pour une pompe à chaleur, le rendement du système (rapport entre l'énergie produite en sortie et l'énergie fournie en entrée) peut être supérieur à 1. Dans les faits, les rendements estimés peuvent aller de 20 à 120, ce qui est bien supérieur à ceux d'une pompe à chaleur, de l'ordre de 5.

Plus généralement, l'exploitation de l'Énergie Thermique des Mers (ETM) consiste en des systèmes similaires qui ne produisent pas seulement de la climatisation : électricité, désalinisation... Ces projets ont un potentiel de développement important. Selon des estimations, un débit de 3 m³/s d'eau puisée à 1000 m de profondeur pourrait produire 5 MW d'électricité.

Le refroidissement des coraux se fait par injection d'eau froide dans la zone d'eau de surface dans laquelle vivent les coraux. Cette zone est homogénéisée rapidement par les vagues et autres





À gauche, schéma de principe d'une SWAC. À droite, le rejet d'eau du circuit primaire de la SWAC de Tetiaroa

mouvements de l'eau. Vouloir refroidir très localement des coraux (à l'échelle du mètre) semble donc irréaliste, car l'eau froide serait instantanément dispersée. Cependant, à l'échelle de l'hectare, les mouvements locaux de l'eau se compensent et l'eau reste plus immobile. Cette échelle paraît plus adaptée pour refroidir un récif de corail.

À cette échelle, le temps de renouvellement de l'eau est généralement déterminé par les marées (environ six heures) mais peut exceptionnellement monter jusqu'à une journée pour des récifs particuliers. Dans ce contexte, l'eau froide injectée rafraîchit le récif plus longtemps, ce qui permet d'en injecter moins. On estime la puissance nécessaire pour rafraîchir de 1 °C à une cinquantaine de watts de refroidissement par mètre cube d'eau refroidie. Par exemple, refroidir dix hectares d'eau (de profondeur 10 m) de 1 °C nécessite une puissance de refroidissement de 50 MW, soit approximativement la puissance d'un porte-avion nucléaire. Si l'eau se renouvelle non pas une fois par jour, mais deux fois par jour, la puissance est alors doublée.

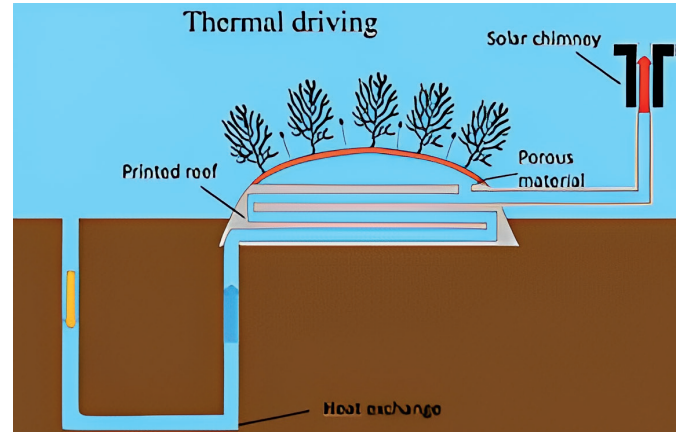
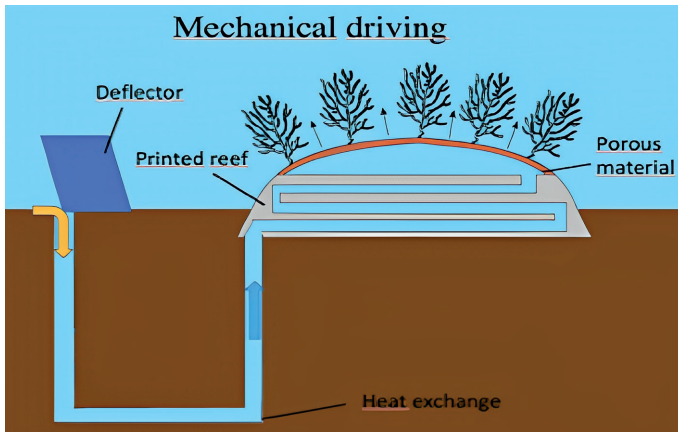
Mais ces puissances sont bien trop importantes pour pouvoir être apportées par un système de refroidissement direct. De plus, des sources de froid très importantes sont présentes naturellement dans l'environnement et peuvent être exploitées. Par exemple, dans le cas des rejets de SWAC à 13 °C, un débit d'un mètre cube par seconde apporte une puissance refroidissante de 60 MW.

Ainsi, la technologie de SWAC suppose de grandes dépenses énergétiques. Si de telles dépenses ne peuvent pas nécessairement être réalisées pour des coraux, une solution peut être d'intégrer cette méthode de refroidissement à des infrastructures déjà existantes de SWAC. Il existe une grande diversité de projets utilisant cette technologie parmi lesquels des installations de climatisation d'hôpitaux, de bureaux, d'hôtels ou encore des projets de désalinisation, ou bien d'aquaculture. L'eau de sortie dans la plupart de ces projets est un déchet que l'on déverse dans la mer. Suffisamment froide, elle peut être réinjectée directement dans les coraux.

Refroidissement passif

Le système SWAC nécessite un apport actif d'énergie, avec une pompe par exemple. Cela peut poser problème en termes de coût d'installation et de technicité. D'autres systèmes proposent de contourner cela en fonctionnant de manière passive. L'eau de surface est refroidie en passant dans le sol, qui joue

le rôle de thermostat. Elle est rejetée au niveau des coraux à une température moindre, et les refroidit. Le mouvement de l'eau peut être engendré par l'énergie de la houle en utilisant des déflecteurs, ou par convection naturelle grâce à une cheminée solaire.

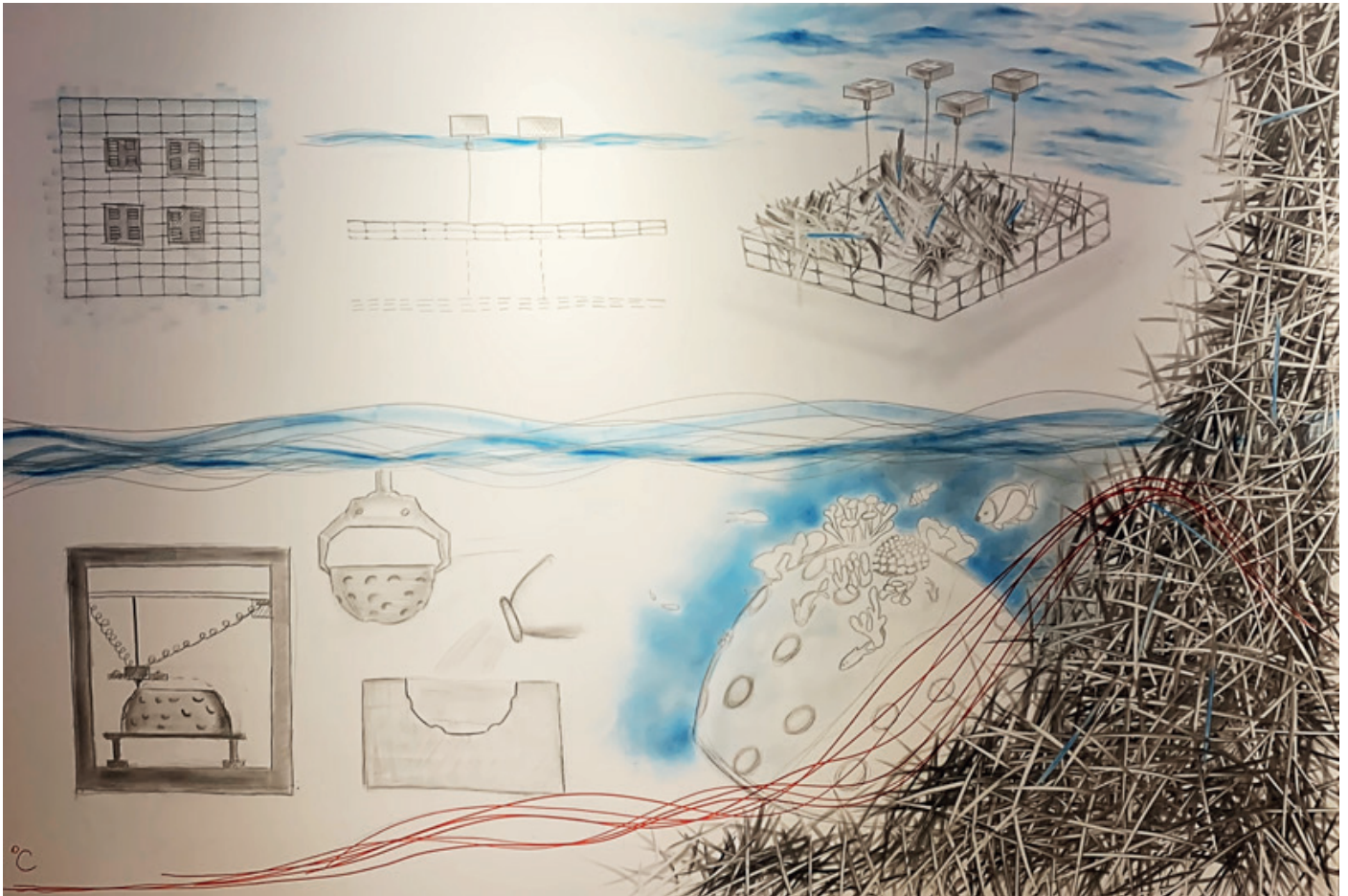


À gauche, un système passif utilisant l'énergie de la houle. À droite, un système passif utilisant la convection naturelle.

Les profondeurs mises en jeu sont bien plus faibles, donc l'efficacité du système est moindre qu'une SWAC. Pour compenser cette faiblesse, il est souvent associé à des récifs artificiels, imprimés en 3D, dans lequel l'eau refroidie circule. Les coraux sont ainsi mieux maintenus en température.

Ceci pose cependant des questions sur la quantité de froid qui peut être stockée dans une épaisseur donnée de sol. En première approximation, la capacité thermique d'une couche de 10 m d'épaisseur de sol est assez comparable

à celle de la couche d'eau de 10 m que l'on cherche à refroidir. Ainsi, maintenir la couche d'eau 1 degré en dessous de sa température normale, reviendrait à réchauffer les 10 mètres de sol de 1 degré par jour (car l'eau se renouvelle en moyenne une fois par jour). Ainsi, on s'interroge sur la pertinence de cette source froide pour refroidir pendant plusieurs mois les coraux...



"L'Arche de Noé sous-marine" et "Etendre les récifs", Dessin technique et œuvre d'art, élèves des Mines, Patrick Frega, 2023

Etendre les récifs

Vers la pépinière parfaite

Suite aux récentes vagues de chaleur conduisant au blanchissement puis à la mort de vastes populations de coraux, les récifs se retrouvent dépeuplés. De plus, l'acidification des océans et les prédateurs naturels des coraux menacent ces écosystèmes. Ces phénomènes ne sont pas irrémédiables, une reprise naturelle des colonies est toujours possible. Cependant, la vitesse de croissance et de maturation des coraux est lente, les vagues de chaleur de plus en plus rapprochées, à tel point que la disparition des colonies semble inévitable. Pour tenter d'enrayer ce déclin, des solutions sont envisagées.

Les coraux sont des animaux qui naissent, croissent et se reproduisent. Au cours de la phase de croissance, le corail se constitue un squelette (structure à 3 dimensions) sur lequel il évolue ensuite suivant un développement en 2 dimensions (branches). Cette deuxième phase est relativement facile et rapide alors que la première est lente (plusieurs mois voire années). Ce premier

développement est critique : il permet aux coraux de se reproduire rapidement et en quantité. Des squelettes préformés, imprimés par une imprimante 3D, peuvent servir de support aux larves des coraux et ainsi favoriser leur croissance. Cette solution existe déjà sous forme de maisons de corail (coral gardening), et il est envisageable d'en améliorer l'efficacité en passant à des formations novatrices.

L'étude de la structure des coraux met en évidence des dynamiques de croissance différentes selon les populations. Imprimer des squelettes artificiels est donc une façon d'orienter la croissance de populations spécifiques. Une impression 3D innovante permet de produire des moules pour la production à grande échelle à l'aide d'argile et de calcium. La rapidité et la facilité de la mise en œuvre sont les atouts principaux de cette solution temporaire, permettant une lutte efficace bien que locale contre le dépeuplement des colonies de coraux.

Structure

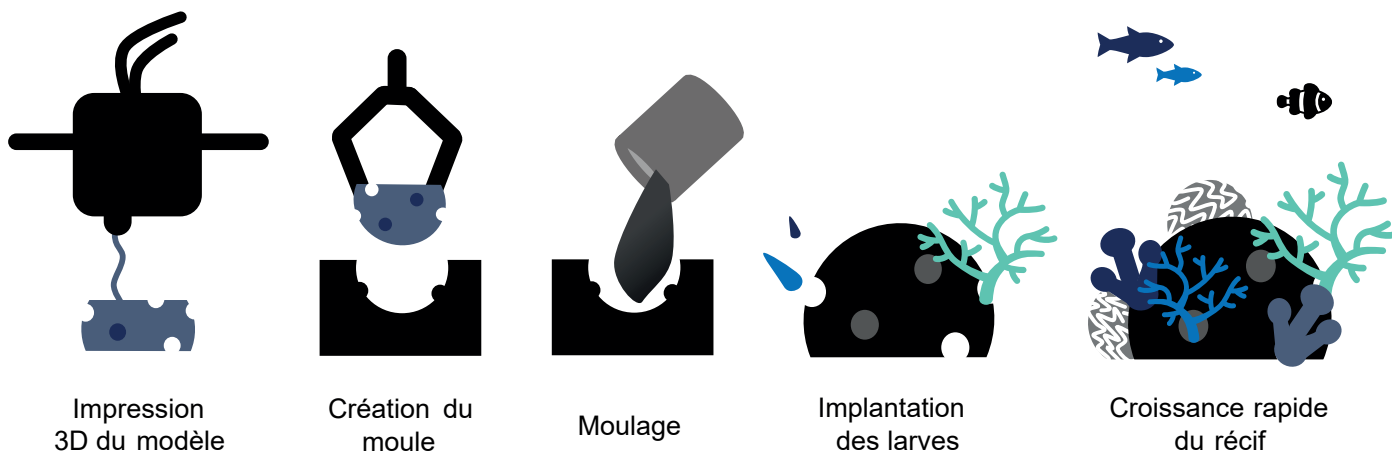
Les squelettes des récifs créés artificiellement sont modélisés à partir de la morphologie de coraux déjà existants, notamment à l'échelle locale. Ces squelettes déjà existants vont permettre aux coraux d'économiser l'énergie nécessaire à sa fabrication et de pouvoir l'utiliser plutôt pour la reproduction. Toutefois, cette méthode demande une étude approfondie des squelettes coralliens naturels pour recréer leur architecture fine, spécifique à chaque espèce.

Une méthode alternative, plus simple, permet de s'affranchir de cette difficulté : créer des grandes structures disposant de sites d'implantation privilégiés pour les larves de coraux. Pour cela, il faut s'intéresser à la rugosité de la structure - pour aider l'implantation des larves et leur protection face aux prédateurs jusqu'à ce qu'elles deviennent des polypes - ainsi qu'à son intégration dans les courants côtiers. En effet, les coraux jouent un rôle crucial d'atténuation des vagues et de protection de

la côte. Il faut donc construire une structure capable de dissiper l'énergie des vagues, tout en restant hospitalière pour les coraux.

L'impression 3D est pertinente pour répondre à ces difficultés. Les pièces créées individuellement peuvent être

répliquées par des moules, pour ensuite permettre une multiplication rapide et facile de ces structures. Elles accueillent sans difficulté poissons et larves de corail, recréant ainsi un habitat optimal pour cet écosystème particulier.



Quel matériau ?

Pour éviter des problèmes de biocompatibilité mais aussi de tenue mécanique, il est préférable de choisir des matériaux proches de la composition chimique des coraux. Pour cela, les chercheurs ont massivement privilégié la CCP (Calcium Carbonate Photoactivated ink), une encre avec laquelle il est possible de faire de l'impression 3D en la faisant durcir à l'aide de rayonnements UV. Il en résulte la

formation de carbonate de calcium, qui, proche de la composition chimique des coraux et contrairement à d'autres matériaux, facilite entre autres l'implantation des larves.

Enfin, pour des productions en dehors des laboratoires, il reste intéressant de considérer d'autres matériaux plus simples comme l'argile ou le calcium, particulièrement pertinents dans le développement de filières locales.

Fabrication

La méthode retenue consiste tout d'abord à faire une impression 3D de la structure conçue numériquement. Ce premier modèle en PLA est ensuite moulé avec du silicone dans lequel on vient verser le fluide de moulage à cuire. Ce modèle final servira à la production des structures coralliennes.

La structure conçue par ordinateur est imprimée à l'aide d'une imprimante

3D FDM (Fused Deposition Modeling) standard chargée de filaments PLA. Après impression, cette structure sera immergée dans du silicone et laissée sécher pendant 3 heures pour créer un moule en négatif. Le moule est ensuite divisé en 2 à 4 parties afin de former entre autres les cavités traversantes prévues lors de la conception de la structure. Enfin, il sera rempli du matériau choisi pour produire la structure.

Dès lors, cette méthode permet l'utilisation répétée des moules produits par impression 3D à l'échelle simple grâce à l'utilisation répétée des moules produits par impression.

Analyse économique et sociale

Les solutions susmentionnées ont un coût prohibitif - de l'ordre de la dizaine de millions d'euros par km² - lorsqu'elles sont déployées à grande échelle, sur des zones de plusieurs kilomètres carrés. Elles sont surtout envisageables pour des îlots de protection au centre de zones sinistrées et proches de côtes habitées, jouant ainsi le rôle de barrière corallienne. Elles permettent ainsi

d'éviter la construction de digues, très coûteuses et délétères pour le tourisme.

Toutefois, la technologie retenue représente une alternative accessible à tous, puisque réalisable avec des matériaux locaux et naturels et des équipements limités (des fours de poterie).

Conclusion

La méthode de développement de squelettes artificiels pour coraux est une technique efficace qui a déjà fait ses preuves. La technologie à l'œuvre (scan de coraux, analyse et étude de la structure, impression 3D et moulage) est maîtrisée et partagée par nombre de laboratoires. De plus, le principe de moulage permet une production à grande échelle. La production de squelettes à partir de moules étant peu coûteuse, une collaboration entre pays permettraient de répartir les frais. Des pays ne pouvant pas nécessairement engager les frais d'impression 3D en calcaire eux-mêmes peuvent, grâce à ces moules, produire tout de même des squelettes en quantité. De plus, le recours à des matériaux naturels et compatibles avec la biodiversité locale évite les problèmes d'intrusion humaine dans la nature.

donc des épisodes de blanchissement de coraux rendent cette solution insuffisante pour éviter la disparition des coraux. En outre, leur capacité d'adaptation à ces structures artificielles privilégiera certaines espèces par rapport à d'autres. La cause de la disparition des coraux étant le changement climatique, la réponse la plus adaptée reste des actions globales contre les émissions de gaz à effet de serre. Une solution locale ne saurait être durable.

Cependant, cette solution permet uniquement un repeuplement et une restauration de la biodiversité rapides, sans pour autant s'attaquer aux causes réelles de perturbation de ces écosystèmes. Sur le long terme, le rapprochement des vagues de chaleur et

L'Arche de Noé sous-marine

Un conservatoire artificiel mobile

Direction du projet

L'innovation apparaît comme une mesure de conservation d'urgence pour protéger un échantillon de l'écosystème, certaines espèces de coraux très menacées, contre les vagues de chaleur ponctuelles en leur permettant de rester dans leur milieu naturel. La taille de la structure comparée à celle d'un récif comme la Grande Barrière de Corail est négligeable. Elle ne sauvera donc pas le récif mais permettra d'en conserver un échantillon de biodiversité.

Un grillage en acier inoxydable contenant des coraux implantés artificiellement de dimensions 100 m x 100 m x 10 cm est disposé à 5 m de profondeur dans un fond marin profond propice à l'établissement des coraux. Ce grillage est relié à 4 bouées émergées identiques de forme rectangulaire avec un

volume suffisant pour avoir la possibilité de maintenir en suspension sous l'eau le grillage. Des moteurs d'une puissance de 2,2 kW sont disposés sur chaque bouée pour permettre de hisser la structure. Des panneaux solaires sur les bouées fourniront l'énergie nécessaire aux moteurs. L'usage de ce système s'effectue dans un but de conservation de la biodiversité : chaque année pendant les périodes de forte chaleur, le récif est descendu à des profondeurs plus élevées pour atteindre de l'eau plus fraîche. Les coraux se développent entre 5 et 25 m de profondeur, c'est donc cette amplitude que la plateforme doit pouvoir reproduire. La vitesse de descente est de 0,001 m/s afin de permettre à l'écosystème de s'adapter aux conditions de pression et de température.

Choix de la zone de placement de la cage

Il faut choisir une zone dont les conditions sont propices au développement des colonies de coraux choisies. Les espèces en danger critique d'extinction telles que les *Isopora Palifera* ou les *Stylophora Pistillata* de l'Océan Indien¹

sont des exemples d'espèces ciblées par le système. De plus, la structure sera placée au-dessus de sable pour éviter de priver de lumière un autre écosystème.

Dimensionnement de la cage

Un écosystème ne devient viable et auto-suffisant qu'à partir d'une dimension caractéristique d'un hectare. La structure aura donc cette surface, qui pourra donc accueillir un écosystème entier et une bonne diversité d'espèces de coraux.

Après analyse des forces agissant sur la cage, il a été décidé d'utiliser une combinaison de tubes et barres en acier inoxydable, les tubes ayant un diamètre de 100 mm et une épaisseur de 12 mm, et des barres pleines de 12 mm de diamètre.

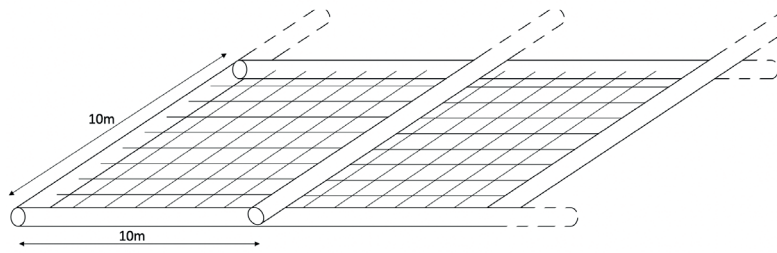


Schéma d'une partie du grillage

La distance entre les tubes de la structure principale est de 10 m et celle entre les barres est de 20 cm. Dans la figure ci-dessus une maille de la structure globale est représentée. Elle est de

100x100 m et sera formée de 2 étages semblables reliés entre eux par des petites barres verticales. La structure obtenue a une masse de 250 tonnes.

$$d_{corail} = 2,17 = \frac{\rho_{corail}}{\rho_{eau}} \Rightarrow \rho_{corail} = 2,17 \text{ kg/L}$$

La masse de corail est environ égale à celle d'un demi parallélépipède plein de corail:

$$m_{corail} \simeq 2,17 \cdot 10^6 / 2 \simeq 1000 \text{ t}$$

D'où:

$$m_{système} = m_{structure \text{ métallique}} + m_{corail} = 250 \text{ t} + 1000 \text{ t} = 1250 \text{ t}$$

$$P_{apparent \ système} = P_{système} - \rho \times V \times g = (m - \rho \times V)g = 7 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Le volume du système est le volume du demi parallélépipède soit:

$$V = \frac{1000 \text{ m}^3}{2} = 500 \text{ m}^3$$

Dimensionnement des bouées

Volume de bouée nécessaire pour soutenir la structure: la poussée d'Archimède est égalisée sur les bouées

(leur poids est négligé) avec le poids apparent de la structure:

$$\rho_{eau} \cdot V_{4 \text{ bouées}} = P_{apparent \ système} \Rightarrow V_{4 \text{ bouées}} = \frac{P_{apparent \ système}}{\rho_{eau}} \sim 7 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

Les 4 bouées occupent donc 7000 m³, ainsi chacune occupe un volume de 2000 m³. Nous choisissons donc les dimensions : 5 m de hauteur et 20 m par 20 m de côté. Cela donne un volume individuel de 2000 m³, donc une marge raisonnable.

Dimensionnement : moteurs et panneaux solaires - demande énergétique du système

On néglige les frottements de l'eau compte tenu de la faible vitesse.

Les moteurs ont pour fonction l'enroulage et le déroulage des câbles reliés à la cage dans le but de moduler la profondeur de la cage. Le poids porté par chaque moteur est de 1.875 millions de Newton. Les câbles rattachés à la plateforme roulent sur une poulie dont la dimension est estimée à 25 cm

de rayon. Ceci implique un couple de 468 750 N/m. La vitesse angulaire est de 0,004 rad/s. La puissance est donc de 1875 W par moteur. Des moteurs de 2,2 kW augmentés de gearbox ont été choisis.

Afin d'alimenter 4 moteurs de 2,2 kW, entre 10 et 40 m² de panneaux solaires sont estimés pour une consommation annuelle de 2000 kWh.

Choix des matériaux

Cage : acier inoxydable dont l'utilisation sous marine est courante (304 ou 316, écroui CP 350, limite élastique de 350 MPa).

Câbles : nylon PVC de densité 1190-1350 kg/m³

Calcul du coût économique

Le coût de l'acier inoxydable est de 1,5 €/kg, d'où un coût de 375 000 € pour l'acier. Le coût total peut être

approximé à environ 400 000 €, plus ou moins 100 000 € en prenant en compte les coûts supplémentaires du système.

Aspects approximatifs et non pris en compte techniquement

Il a été choisi de ne pas considérer les risques de dérive en cas de fortes tempêtes. Pour résoudre ce problème il aurait été possible d'ancrer davantage le système, mais cela soulève d'autres problèmes quant à la préservation du fond se trouvant en dessous de la structure. Un autre point est celui de l'alourdissement de la structure lié à la croissance des coraux qui engendrerait

un redimensionnement nécessaire des bouées. Enfin, des approximations ont aussi été effectuées sur les gradients de température dans les zones étudiées. Il a été considéré qu'en cas de fortes chaleurs, une baisse de 1 à 2°C de la température de l'eau pouvait s'obtenir par une augmentation de profondeur de 5 m en moyenne.

Enjeux socio-économiques

L'installation de ces structures d'un hectare, situées à une profondeur de 5 mètres, accroît les risques de collision avec les navires et limite l'accès des embarcations de pêche en eau profonde à cette zone. De plus, un coût estimé

à 400 000€ par structure nécessite un investissement non négligeable pour les institutions qui subventionnent le projet. En outre, une pollution sonore à cause des moteurs est un risque potentiel à surveiller. Pour ce qui est des

points positifs, ce type d'installations maritimes nécessite une main d'œuvre qualifiée pour la conception, l'installation, la maintenance et la gestion des

équipements. Ainsi, leur développement peut stimuler la création d'emplois dans différents domaines.

Empreinte carbone

Pour que l'empreinte environnementale soit rigoureusement déterminée, une analyse de cycle de vie (ACV) doit être effectuée, ce qui permet de prendre en compte l'impact complet, de la production à la fin de vie, de la technologie sur l'environnement.

L'empreinte carbone du système est limitée à celle de l'acier et des panneaux solaires :

Puissance du système : 8.8 kW

Energie nécessaire pour les déplacements à réaliser : ~ 2000 kWh

Empreinte carbone du photovoltaïque (source ADEME) : 43.9 gCO₂e/kWh

Empreinte carbone des panneaux solaires du système : 88 kg CO₂e/tonnes

Empreinte carbone de l'acier recyclé (source ADEME) : 300 kg CO₂e/tonnes

Masser d'acier : 250 tonnes

Empreinte carbone de l'acier du système lissé sur 50 ans : 1500kCO₂e/an

Empreinte carbone du système : ~ 1.6 tonnes CO₂e/an

Passage à l'échelle

Le conservatoire est de 1 hectare. La Grande Barrière de Corail a une surface de 344 000 km². Placer un seul conservatoire dans ce récif serait comme poser une pièce de 1 centime sur un terrain de foot. Il faudrait donc un passage à l'échelle conséquent pour préserver ne serait-ce que 0,1% du récif. D'où l'intérêt de prioriser ce système pour des espèces particulièrement menacées. Une version alternative serait d'implanter 100 plaques de 5m sur 5m, toutes contrôlées par un moteur, espacées d'environ 1 km chacune. Cela permettrait de toucher une plus grande zone et de préserver des portions d'écosystèmes plus divers. Une version low tech peut être envisagée avec un système de tirage manuel.



“Les ingénieurs peuvent-ils sauver les coraux ?”, Vidéo (1m7s), élèves des Mines, H2M Video, 2023. <https://youtu.be/31nLltxMuhk>

Les ingénieurs peuvent-ils sauver les coraux ?

Une synthèse comparative

Reprenons l'exposition. Les différentes technologies explorées présentent des qualités et des faiblesses qui ne permettent pas de les classer dans l'absolu. En revanche, il est possible de mener une analyse qualitative pour les comparer et choisir la technologie la plus adaptée à chaque situation. Quatre critères d'étude ont été dégagés : la faisabilité logistique, le temps de développement, les impacts environnementaux et l'acceptabilité sociale. Il est important de noter qu'il s'agit de nos estimations puisque presque

aucune de ces techniques n'a déjà été mise en place.

Nous avons commencé par étudier le temps nécessaire à la mise en place des solutions. Ce temps de développement correspond dans notre étude au temps nécessaire à la recherche et au développement de la solution. Certaines solutions comme l'entraînement et l'hybridation sont particulièrement longues à mettre en place. D'autres, comme l'ombrage et les récifs artificiels, sont moins complexes et donc rapidement déployables.

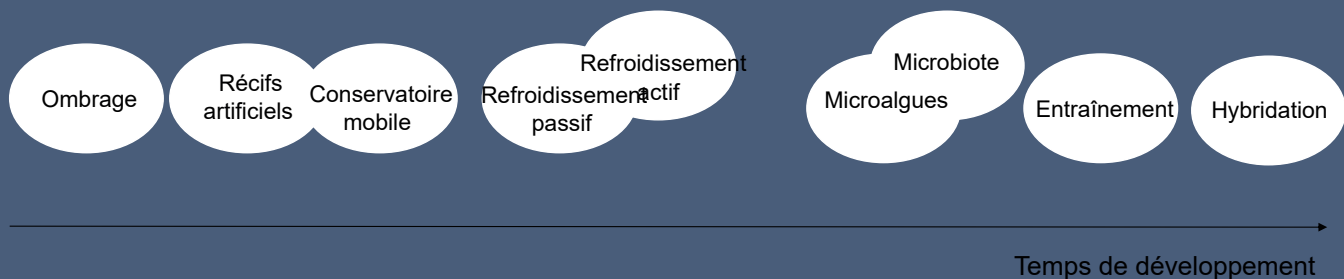


Figure 1 : Temps caractéristique de développement des technologies

Le graphe suivant permet de visualiser la faisabilité logistique des différentes solutions en fonction des effets indésirables induits sur l'environnement. Cette faisabilité logistique a été évaluée qualitativement à partir des coûts économiques et des ressources physiques nécessaires (humaines, de matériel, de transports, ...) pour l'implémentation des solutions. L'impact sur l'environnement prend en compte les émissions de gaz à effet de serre et

les effets de la conception, du transport et de l'implémentation des différentes techniques sur la biodiversité. Les techniques de récifs artificiels, d'ombrages et de conservatoire mobiles sont les plus avantageuses selon ces critères. L'entraînement et le refroidissement le sont moins. Par ailleurs, le bas niveau de faisabilité des techniques de refroidissement s'explique par les coûts très élevés associés à leur mise en place.

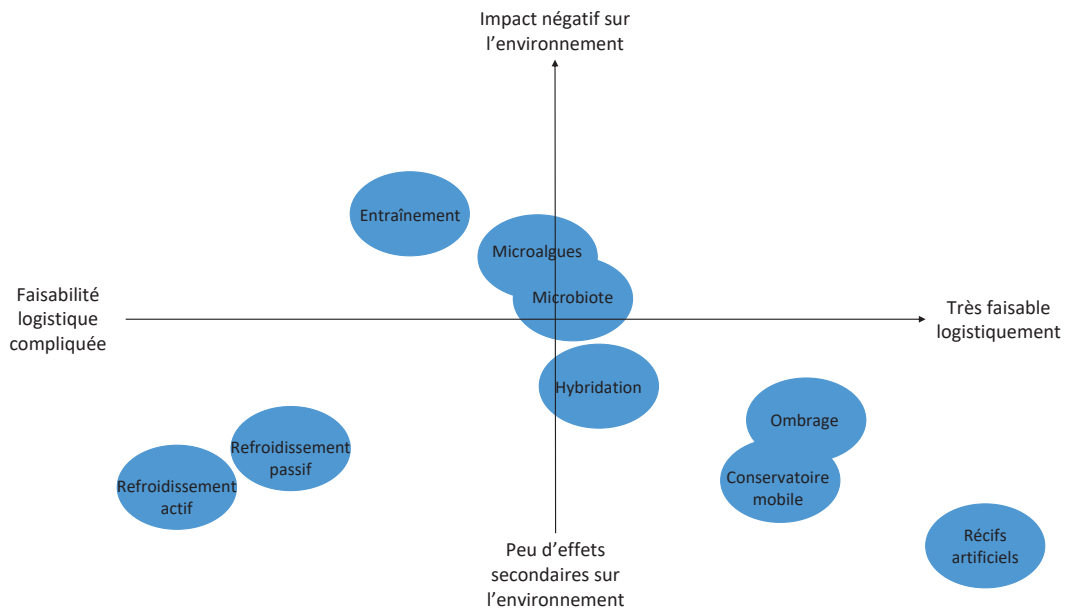


Figure 2 : Effets secondaires environnementaux et faisabilité logistique des technologies

Les deux graphiques précédents permettent de représenter la simplicité de développement des solutions pour le premier et la comparaison externalité/faisabilité pour le second. Par exemple, le refroidissement passif, demande peu de recherche mais présente des difficultés considérables de mise en œuvre pratique. Plus généralement, même si une solution semble cocher tous les critères de pertinence, il ne faut pas

négliger son impact environnemental : ce serait un non-sens de protéger les coraux en détruisant le reste de la biodiversité environnante. Notons tout de même que ces graphiques ne sont pas exhaustifs: l'ombrage et le conservatoire mobile posent par exemple des problèmes d'acceptabilité sociale non mentionnés ici.

Quelle place pour le cadre juridique ?

La plupart des innovations présentées dans cette exposition n'en sont encore qu'au stade de recherche. Les autres, dans le cas où leur déploiement est jugé souhaitable, nécessitent toutefois un cadre économique et législatif favorable. Les structures politiques en place permettent-elle de répondre à un tel enjeu ?

Au niveau international, les institutions tentent d'inciter les Etats et les industriels à protéger l'océan et les récifs coralliens. Sous l'impulsion de l'ONU, à l'image de la Convention sur la Diversité Biologique, des grands principes sont énoncés concernant la gestion

et la sauvegarde des écosystèmes, comme la coopération interétatique. Si la volonté d'agir est présente, les traités ne sont pas assez contraignants dans les faits. Les longs délais des négociations internationales sont peu adaptés à l'urgence de la disparition des coraux et le cadre législatif et diplomatique a tendance à privilégier les intérêts économiques nationaux. Par ailleurs, environ 80% des coraux se situent en Zones Économiques Exclusives (ZEE) où ils relèvent d'une souveraineté nationale. Le droit local occupe donc une place de choix pour initier un mouvement de plus grande ampleur.

L'Australie a décidé d'agir en mettant en place en 2015 un plan global de préservation de la Grande Barrière de corail qui repense l'impact des activités humaines sur l'océan. Ce plan s'intègre dans les accords de Paris avec l'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre jusqu'à la neutralité carbone en 2050. Il a aussi pour but d'agir sur de nombreux fronts tels que la lutte contre la pêche illégale, le financement de projets de recherche et l'amélioration de la qualité de l'eau. En effet, outre le changement climatique, d'autres menaces pèsent également sur le corail : l'excès de sédiments, la pêche illégale, la pollution de l'eau par des algues, plastiques ou pesticides... Parmi les projets de recherches financés, certains reposent sur les solutions techniques présentés précédemment telles que des projets d'ombrage, de refroidissement ou de création de nouvelles structures de récifs. Les actions

prises sur la qualité de l'eau ont permis une réduction de 25,5% des déchets azotés et de 14,6% de la charge de sédiments. 44,6 tonnes de déchets ont également été ramassés sur les plages bordant la barrière de corail et 125 projets d'amélioration de la qualité de l'eau ont été financés. Enfin, 13 000 hectares de coraux ont été protégés des étoiles de mer, un prédateur du corail dont la population a explosé en raison du dérèglement climatique. Cet exemple illustre que de très nombreux problèmes affectant les coraux sont directement liés aux activités internes des pays et que l'élaboration d'un cadre légal autour de ces enjeux permet de prendre rapidement des mesures pour sauvegarder les écosystèmes. Cependant, ces actions restent encore trop rares. Pour parvenir à un résultat à grande échelle, elles devront être répliquées par de nombreux pays.

Les ingénieurs peuvent-ils sauver les coraux ?

Face au réchauffement inévitable de nos océans, l'utilisation de la technique fera partie d'un tout nécessaire pour ralentir la disparition imminente des récifs coralliens. Mais son utilisation doit s'inscrire dans une pensée écosystémique, en prenant en compte les retombées sociales et environnementales trop souvent délaissées.

La technique à elle seule ne sera pas suffisante. Les solutions présentées ici adressent la conséquence d'un mal au lieu de sa cause. Elles ne doivent pas nous faire perdre de vue l'origine principale du blanchissement des coraux : le dérèglement climatique.

Face à cette crise majeure, aux multiples facettes, les ingénieurs ont un rôle à jouer qui dépasse la proposition de solutions purement techniques.

Malgré tout, ils ne pourront rien sans la coopération de chacun et chacune d'entre nous. L'action individuelle est un premier pas nécessaire, et c'est surtout en tant que citoyen et citoyenne que nous possédons un pouvoir d'influence fort, en appelant et participant à des changements structurels et politiques d'ampleur face au changement climatique.

Bibliographie

Baird M. E., Green R., Lowe R., Mongin M., Bougeot E. (2020). "Optimising cool-water injections to reduce thermal stress on coral reefs of the Great Barrier Reef"

Bozec Y.M., Peter J., Marine Spatial Ecology Lab, School of Biological Sciences and ARC Centre of Excellence for Coral Reef Studies, University of Queensland, St Lucia, QLD 4072, Australia. "Detailed description of reefmod-GBR and simulation results"

Country Analysis Executive Summary: Australia.

FFEM et Océanopolis (2021). Les écosystèmes marins. Les coraux, bâtisseurs de récifs.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). "Rapport de synthèse : changements climatiques 2014. Copenhague".

Piggot A. M., Fouke B. W., Sivaguru M., Sanford R. A., Gaskins H. R. (2009) "Change in zooxanthellae and mucocyte tissue density as an adaptive response to environmental stress by the coral, *Montastraea annularis*".

ScienceDirect. "Floating photovoltaic power plant: A review". <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304841?>

Souter D., Planes S., Wicquart J., Logan M., Obura D., Staub F. (2021) "Status of coral reefs of the world: 2020 report. Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN)/International Coral Reef Initiative (ICRI)" <https://gcrmn.net/2020-report/>

Spencer R. S., Macknick J., Aznar A., Warren A., Reese M. O. (2019) "Floating Photovoltaic Systems: Assessing the Technical Potential of Photovoltaic Systems on Man-Made Water Bodies in the Continental United States".

"Valeur des récifs - Résilience des récifs. (s. d.)". <https://reefresilience.org/fr/value-of-reefs/>



Ca chauffe pour les récifs !
Catalogue de l'exposition
Mines de Paris-PSL
Musée Océanographique de
Monaco

