

NICOLAS FLOC'H

La couleur de l'eau, peinture productive sonore, 2017, parole d'Hubert Loisel

La couleur de l'eau est depuis toujours utilisée par les oiseaux et les mammifères marins pour détecter les eaux productives dans lesquelles il y a du phytoplancton et qui sont donc, potentiellement, poissonneuses. Les hommes ont également toujours été sensibles aux variations de teintes des surfaces océaniques, tant d'un point de vue artistique qu'à des fins pratiques. Il en est ainsi par exemple des pêcheurs, qui recherchent l'eau verte et poissonneuse. En 1930, ceux des Shetland ont été jusqu'à mettre des aviateurs à contribution pour les repérer. Les navigateurs, quant à eux, devinent la proximité d'une côte à partir d'un changement de couleur de la mer qui, d'un bleu profond au large, décrit toute la palette des verts, jusqu'aux différentes nuances de marrons à l'approche des terres. Pourquoi aussi s'intéresser scientifiquement à la couleur de l'océan ?

Dès les années 1970, on a commencé à acquérir des mesures, dites radiométriques, sur la propagation de la lumière dans les couches océaniques afin, entre autres, d'estimer la quantité de lumière disponible pour la photosynthèse, mais également afin d'étudier des raisons de ces changements de couleur. En surface la couleur varie pour plusieurs raisons. Tout d'abord par réflexion de la lumière directe du soleil et de la lumière diffuse du ciel à la surface de la mer, la surface peut se teinter de gris et de bleu foncé lorsque le ciel est couvert, et passer du rose au rouge lors du coucher du soleil.

La deuxième cause de variation, celle qui nous intéresse tout particulièrement est liée à la composition du milieu marin. La vie est riche sous la surface océanique, et les organismes qui interagissent avec la lumière du jour sont nombreux : le phytoplancton (organisme monocellulaire à la base de la photosynthèse, donc de la chaîne alimentaire océanique), les virus, les bactéries et le zooplancton. Il faut en fait considérer l'océan comme une grande forêt ou une grande prairie avec de multiples fleurs, de multiples arbres. Une végétation aux spécificités propres ayant un rôle clé dans les cycles du carbone qui peut être largement impacté par les modifications climatiques d'origine na-

turelle ou humaine. Une partie des photons issus de la lumière du jour pénètre sous la surface océanique, et interagit avec ce qu'il y a dans l'océan, c'est-à-dire avec les molécules d'eau, mais également avec toutes les substances organiques (vivantes et mortes) et minérales optiquement significatives. Une partie de ces particules de lumière, les photons, va alors être absorbée par les molécules d'eau, modifiant ainsi la température de la surface de l'eau, mais également par les pigments du phytoplancton, permettant ainsi la création de matière organique par photosynthèse. Une infime partie de ces photons va en revanche pouvoir s'échapper de la couche océanique par diffusion. Les variations de couleur qui découlent de ces processus d'absorption et de diffusion témoignent de cette vie aquatique.

D'un point de vue scientifique, la couleur de l'océan représente le spectre de la lumière visible rétrodiffusé par la couche de la surface océanique. La signature spectrale de cette lumière qui ressort de l'océan fournit de précieuses informations sur la composition biologique et minérale des eaux de surface. Par exemple les cellules phytoplanctoniques qui sont à la base de la synthèse océanique, absorbent la lumière bleue et la lumière rouge, mais peu le vert. Un océan chargé en phytoplancton prendra ainsi une teinte verte. À l'inverse, avec peu de phytoplancton, la lumière bleue est moins absorbée et l'océan décrit alors les différentes nuances du bleu observées en particulier dans les eaux du large. En se rapprochant des côtes, là où la concentration en phytoplancton est plus importante, on retrouve plutôt des teintes vertes (dues à l'absorption de la lumière bleue). Dans les eaux très pures, comme celles rencontrées dans le gyre subtropical du Pacifique Sud, une zone isolée par des courants océaniques spécifiques, il y a peu de vie et les eaux prennent alors une teinte violette. Ce qu'on voit là, c'est vraiment le spectre de l'absorption de la lumière par les molécules d'eau. La présence de substances organiques et minérales, avec leurs propriétés optiques propres, teinte les surfaces océaniques sur une palette de couleurs très large. Si ces changements de couleur peuvent être observés en mer, ces dernières peuvent également être visibles depuis l'espace, et donc être mesurées par des capteurs embarqués bord d'un satellite. Différentes méthodes sont alors utilisées afin de convertir le signal capté par le satellite au sommet de l'atmosphère, en paramètres biogéochimiques liés à la composition du milieu marin.

Peintures sonores

Les satellites ont l'avantage d'apporter une vue globale de l'océan. De plus, la disponibilité de données satellites de la couleur de l'eau depuis les années 70, permet d'en étudier les modifications aux échelles saisonnières, interannuelles, et sur le long terme. Ces données permettent de connaître, par exemple, la répartition géographique des zones productives et leurs évolutions en relation avec les différentes perturbations naturelles ou anthropiques, dont le réchauffement climatique. La résolution spatiale : monochromie vs polychromie, c'est la combinaison des phénomènes d'absorption et de diffusion à différentes longueurs d'onde du domaine visible, c'est-à-dire monochromes, qui nous informe sur la concentration en phytoplancton, mais également en carbone organique et inorganique (entre autres). Les développements méthodologiques récents nous permettent d'aller jusqu'à la détection de groupes phytoplanctoniques et d'acquérir des informations sur la concentration et la taille des particules en suspension, à partir de l'observation spatiale de la couleur de l'océan. La résolution spatiale à laquelle l'océan peut être observé, c'est à dire la taille du pixel, est environ 300 m² à 1 km². L'observation satellite nous a permis de montrer que l'océan du large est loin d'être homogène, avec des zones pauvres et des zones très productives, au sein desquelles de nombreux filaments issus de l'activité turbulente existent. En couplant la physique et la biogéochimie, la science océanographique a réalisé que ces filaments représentent des zones productives et donc des couleurs très différentes. On a donc une monochromie si on observe l'océan à moyenne échelle mais plus on rentre dans le détail, plus on s'aperçoit que cette monochromie est composée de toute une variété de couleurs.

Afin de répondre aux enjeux environnementaux actuels, l'Europe vient de lancer un programme appelé Copernicus, programmant des lancements de satellites sur les trente prochaines années pour observer la terre, et notamment l'océan, avec des résolutions spatiales et spectrales améliorées. Le signal reçu par le satellite est une moyenne de ce qui se passe à l'intérieur du pixel. Or 1 km² dans l'océan ouvert, c'est extrêmement petit. Par exemple, un tourbillon océanique peut faire 100-300 km de diamètre, et, avec des pixels de 1 km², on est donc à même d'échantillonner correctement cette variabilité spatiale.

On a parlé pour l'instant de l'observation à partir de l'imagerie « couleur de l'océan », qui est une observation passive, faite à partir d'une source d'énergie extérieure, le soleil. Cela nous permet d'avoir des informations dans la colonne d'eau, jusqu'à ce qu'on appelle la première profondeur de pénétration qui peut aller jusqu'à environ 40 m dans l'océan ouvert, mais qui varie fortement suivant les longueurs d'onde et la composition du milieu (par exemple, plus il y a de substances absorbantes et plus cette couche va être faible).

A partir de l'espace on commence à utiliser maintenant ce que l'on appelle un « lidar ». Contrairement aux satellites « couleur de l'océan », c'est un capteur actif qui a sa propre source d'énergie. Ce capteur est doté d'une source laser qui permet d'aller beaucoup plus profond, apportant ainsi des informations sur la structure verticale de la composition du milieu marin. Toutes les images satellites acquises doivent être validées. Les océanographes vont donc en mer pour faire des mesures radiométriques. Ils plongent un instrument dans la colonne d'eau et obtiennent une information sur le spectre de la lumière à chaque profondeur. Quand on nage dans l'océan et quand on plonge, on s'aperçoit que celui-ci n'est pas rouge en profondeur, le rouge étant absorbé rapidement par les molécules d'eau dès la surface, puis le jaune et le vert. Le bleu qui est la dernière longueur d'onde à être absorbée, est celle qui subsiste en profondeur. En effet, les substances optiquement significatives présentes comme les molécules d'eau, le phytoplancton, et les substances détritiques issues du phytoplancton, combinent leurs absorptions respectives. De l'addition des spectres d'absorption de ces différentes substances, résulte un minimum d'absorption plutôt dans le bleu. Plus on va en profondeur, plus l'océan nous apparaît avec des teintes bleutées.

Du fond de l'océan, les sels nutritifs viennent fertiliser les eaux en surface grâce à la dynamique océanique qui permet de faire remonter les eaux du fond, riches en sels nutritifs, vers la surface.



L M N O

Peintures sonores

Dans la couche lumineuse (couche euphatique), un processus de photosynthèse va s'enclencher sous l'effet de cette fertilisation, et la concentration en chlorophylle augmentera jusqu'au moment où les sels nutritifs seront épuisés, et que le zooplancton aura consommé une partie du phytoplancton. S'ensuit alors une décroissance de la chlorophylle dans les eaux de surface. L'océan se stratifie en se réchauffant, eau chaude au dessus, froide au-dessous. L'augmentation de la température de la couche de surface, favorisant la stratification océanique, il est dès lors plus difficile de recevoir en surface des nutriments venant du fond de l'océan. La concentration en chlorophylle diminuant, l'océan devient alors de plus en plus bleu. En se rapprochant des zones côtières, les couleurs varient, un phénomène qui semble s'accroître depuis la dernière décennie, et cela en partie dû à l'activité humaine. Par exemple, un barrage sur une grande rivière diminue le flux de sédiments qu'elle charrie et, à l'embouchure, les eaux s'éclaircissent. C'est typiquement ce qui se passe avec le Mékong où le delta est en train de perdre en superficie alors qu'il gagnait du terrain depuis des siècles. La pigmentation du phytoplancton est un élément essentiel dans les variations de couleurs qu'on observe à la surface de l'océan. En particulier dans les zones côtières où on a ce qu'on appelle des blooms phytoplanctoniques (présents aussi dans l'océan du large), effervescences assez rapides de la concentration de certaines espèces qui absorbent la lumière à des longueurs d'ondes très spécifiques. Parmi ces effervescences phytoplanctoniques, on peut distinguer les red tides, ou marées rouges. L'océan devient rouge, et même rouge vif, lorsque certaines espèces phytoplanctoniques, généralement toxiques, apparaissent en masse. Cette pigmentation spécifique et cette concentration importante du même pigment rougissent les eaux en surface. Les nombreux pigments présents dans chaque espèce phytoplanctonique sont en partie responsables des différentes colorations que les eaux peuvent prendre lors de ces blooms.

Dans les zones côtières, quand il y a des efflorescences de ces algues toxiques ou nuisibles, on voit nettement l'océan changer de couleur. Dans de nombreuses zones côtières, comme par exemple en Californie ou au Chili, ces blooms de cyanobactéries donnant cette coloration rouge aux eaux de surface sont relativement fréquents. En

France, on peut avoir du phytoplancton poussant très vite en raison de rejets massifs de sels nutritifs dans l'océan. Cette concentration forte de sels nutritifs favorise la poussée rapide de certaines espèces qui teintent de façon brutale l'océan d'un vert dur ou de rouge.

Dans les zones appelées oligotrophes, zones relativement pauvres, s'est développé en profondeur, typiquement autour de 80 à 100 mètres, un maximum de chlorophylle-a. Ce maximum profond, où la concentration peut être jusqu'à cinq fois plus forte qu'en surface, s'explique pour différentes raisons. En profondeur et comme il y a de moins en moins de photons, la cellule, ayant besoin de lumière, va développer ses petites antennes, ces capteurs que sont en fait les pigments de chlorophylle-a. Comme il y a moins de lumière, elle les développe de plus en plus pour capter les photons résiduels. Ce processus (appelé photo-acclimatation) est l'une des raisons pour laquelle on observe une augmentation de chlorophylle-a en profondeur. Plus la concentration en chlorophylle-a est importante, et plus la lumière dans le bleu est absorbée au niveau des couches profondes, on a donc une lumière plus bleue en surface et légèrement plus verte au niveau du maximum profond donc un spectre de la lumière visible qui change.

Il y a énormément de vie dans l'océan, c'est le premier réservoir de carbone sur terre, beaucoup plus important que ce que l'on a dans l'atmosphère, a foisonne de vie, même une eau bleue qui nous apparaît n'être que de l'eau est le siège de millions de cellules. L'océan est extrêmement riche et c'est grâce à lui aussi qu'est produit une grande partie de cet oxygène dont on a besoin. Quand on se rapproche du milieu côtier, les teintes deviennent extrêmement variables et, si on a la chance d'être là pendant des effervescences phytoplanctoniques, comme exemple cette espèce qu'on appelle coccolithophores, qui sont des espèces calcifiées donnant cette couleur turquoise aux eaux de surface, on voit des dégradés, du blanc au bleu très dur, sur des surfaces relativement petites.

LMNO

Peintures sonores

Ces blooms de coccolithophoridés dégagent un certain gaz dans l'atmosphère, le DMS, qui intervient aussi dans la formation des nuages via la formation de noyaux de condensation nécessaires à ces nuages. Par là, je veux dire que tout est très interconnecté. Le phytoplancton qui est dans l'eau est lié à ce qui se passe sur terre, et à ce qui se passe dans l'atmosphère. Par exemple, on s'est aperçu que les zones océaniques pauvres en phytoplancton, donc des eaux très bleues, sont ainsi parce qu'elles sont dépourvues en fer. Pour que le phytoplancton pousse, il lui faut de la lumière et des sels nutritifs. Ces zones-là ont les deux et on ne comprenait pas pourquoi la concentration en chlorophylle était si basse. En fait c'est parce qu'il manque le fer qui est nécessaire au phytoplancton pour assimiler les nitrates. Ce fer est apporté par voie aérienne depuis les continents au travers de particules minérales, ou par les éruptions volcaniques. Par exemple, les épisodes de poussières désertiques du Sahara traversent l'Atlantique et pour partie se déposent dans l'océan. Par ces poussières, les vents apportent du fer aux eaux de surface, ce qui permet au phytoplancton de pousser.

On peut imaginer, d'un point de vue artistique, que la désertification occasionnée par le réchauffement et par l'activité humaine est à l'origine de plus en plus d'évènement-poussières. Le désert s'agrandit, il y a de moins en moins de végétation, on a alors une modification de couleur au niveau terrestre. Ces poussières d'origine désertique transportées par le vent, vont se déposer dans l'océan, ce qui fertilise les eaux de surface, occasionnant une poussée du phytoplancton, changeant à son tour la couleur de l'océan.

En fait la couleur de l'océan telle qu'on l'observe à l'œil nu ou à partir de satellite, c'est une couleur qui change en permanence. Pourquoi change-t-elle ? On a expliqué les phénomènes physiques mais ce qui induit ces changements est effectivement ce qu'il y a dans l'océan. Et ce qu'il y a dans l'océan est issu des interactions multiples qu'il y a entre l'océan et l'atmosphère, l'océan et les glaces de mer, l'océan et le continent.

Lorsqu'un fleuve se jette dans la mer, il change la couleur de l'eau, qui devient de plus en plus marron, mais il apporte également aux eaux les sels nutritifs, provoquant ainsi une poussée phytoplanctonique (si les eaux sont limitées en nutriments). De même le vent soufflant la surface de l'océan modifie sa

couleur par trois processus. Il va d'abord générer des moutons à la surface de l'océan qui vont la blanchir. Ce vent peut également occasionner, sous certaines conditions, une remontée des eaux profondes riches en sels nutritifs, fertilisant les eaux de surface et augmentant ainsi la concentration en chlorophylle. Enfin le vent transportant les poussières désertiques est à l'origine de la fertilisation des eaux de surface (dans l'Atlantique Nord à partir du Sahara, et dans le Pacifique Nord partir de poussières issues du désert de Gobi). Chaque fois qu'il y a des événements de poussières et qu'elles se déposent sur les eaux de surface, si cette zone est dépourvue en fer, on a une poussée rapide de la concentration en chlorophylle. Si on se trouve en bateau dans une telle zone et si on dépose du fer sous la forme qu'il faut pour que le phytoplancton puisse l'assimiler, on verra quasi instantanément une poussée de phytoplancton, donc une couleur qui varie du bleu au vert.

Tous ces changements de couleur dans les eaux de surface océaniques sont dus à des phénomènes biogéochimiques se déroulant dans l'eau, mais aussi à de fortes interactions entre le continent et la mer, comme par exemple, la remise en suspension des sédiments du fond, l'apport de nutriment par les fleuves, ou le lessivage des côtes à la suite d'un orage. L'océan est en permanence en interaction avec l'atmosphère, les continents, et les glaces et toutes ces interactions induisent des changements de couleurs au niveau des couches de surface océanique.

LMNO