

TRENTE ANNÉES D'OBSERVATION DES MICROALGUES ET DES TOXINES D'ALGUES SUR LE LITTORAL

Catherine Belin, Dominique Soudant



Trente années
d'observation
des microalgues
et des toxines d'algues
sur le littoral

Trente années d'observation des microalgues et des toxines d'algues sur le littoral

Catherine Belin et Dominique Soudant

Éditions Quæ
c/o Inra, RD 10, 78026 Versailles Cedex

Collection Update Sciences & Technologies

Stratégies des filières fromagères sous AOP en Europe

Modes de régulation et performance économique

P. Jeanneaux

2018

Services écosystémiques et protection des sols

Analyses juridiques et éclairages agronomiques

C. Hermon, coord.

2018

Paroles de chercheurs

Environnement et interdisciplinarité

E. Brun, J.-F. Ponge, J.-C. Lefeuvre

2017, 124 p.

Démanteler les barrages pour restaurer les cours d'eau

Controverses et représentations

R. Barraud, M.-A. Germaine, coord.

2017, 260 p.

© Éditions Quæ, 2018

ISBN : 978-2-7592-2940-6

ISSN : 1773-7923

ISBN PDF : 978-2-7592-2941-3

ISBN ePub : 978-2-7592-2942-0

Le code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Remerciements	1
Préface	3
Introduction	5
Chapitre 1. Contexte	7
Quels « services » le phytoplancton procure-t-il ?.....	7
Pourquoi observer et surveiller le phytoplancton ?.....	8
Quels sont les enjeux prioritaires d'une observation du phytoplancton côtier ?	10
Enjeux de santé publique.....	13
Ce qu'ont déjà montré les données du Rephy	14
L'observation du phytoplancton : un enjeu capital	14
Chapitre 2. L'observation et la surveillance du phytoplancton et des phycotoxines	17
Historique.....	18
Le Rephy	24
Le Rephytox.....	39
Les données Rephy et Rephytox : bancarisation, mise à disposition et valorisation.....	44
Chapitre 3. Les données phytoplancton	49
Contexte général sur le littoral français métropolitain	49
État des lieux des séries de données Phytoplancton	51
Concentrations régulières fortes à très fortes de certains taxons	54
Les taxons jugés dominants	79

Évaluation de la qualité des eaux littorales avec les outils DCE	82
Les espèces phytoplanctoniques toxiques ou nuisibles	98
Les espèces phytoplanctoniques « emblématiques » du littoral français métropolitain	109
Tendances à long terme des séries de données phytoplancton.....	117
Conclusion.....	126
Chapitre 4. Les données hydrologie	127
Température de l'eau	128
Chlorophylle <i>a</i>	132
L'impact de l'azote inorganique dissous sur la chlorophylle <i>a</i>	132
Indicateurs hydrologiques évalués dans le cadre de la DCE.....	139
Chapitre 5. Les données phycotoxines	141
Les phycotoxines nuisibles pour les humains.....	142
Les familles de toxines présentes sur le littoral français.....	143
Trente ans de résultats sur les trois familles de phycotoxines réglementées (DSP, PSP et ASP)	150
Chapitre 6. Perspectives	177
Conclusion	181
Glossaire	183
Références bibliographiques	185
Annexe 1. Textes réglementaires ou guides cités dans le texte	195
Annexe 2. Zones marines	197
Annexe 3. Masses d'eau DCE	201
Annexe 4. Implantations Ifremer pour la mise en œuvre du Rephy	205
Annexe 5. Principaux sites Web cités dans le texte	207
Annexe 6. Taxons identifiés dans les données Quadrigé-Rephy sur tout le littoral métropolitain, période 1987-2016	211
Crédits iconographiques	251

Remerciements

Nos premiers remerciements vont aux contributeurs de cet ouvrage, par ordre alphabétique : Zouher Amzil pour ce qui relève des toxines et du phytoplancton toxique ; Cédric Bacher pour le contexte et la définition des objectifs de ce que doit être un véritable observatoire du phytoplancton ; Nicolas Chomérat pour ce qui concerne la taxinomie et l'écologie du phytoplancton ; Anne Daniel pour les aspects relatifs à l'hydrologie et à la physico-chimie ; Philippe Gros pour l'introduction et le contexte, ainsi que la mise en perspective du rôle du phytoplancton dans l'histoire des écosystèmes marins ; Philippe Souchu pour son expertise sur l'écosystème de la baie de Vilaine et sur Dinophag.

Merci à Jérôme Paillet pour avoir encouragé et préfacé cet ouvrage, et pour sa confiance à l'égard du Rephy*¹.

Nous sommes particulièrement reconnaissants envers Bruno Barnouin et Benoît Beliaeff, qui ont été des managers incomparables. Par leur exigence et leur soutien, ils ont largement contribué à structurer le Rephy et à en faire ce qu'il est devenu : incontournable dans le paysage national et international.

Nous exprimons toute notre gratitude aux personnels des laboratoires Environnement-Ressources de l'Ifremer — que nous ne pouvons malheureusement pas tous citer tellement ils sont nombreux — pour la mise en œuvre du Rephy et du Rephytox* durant ces trente années. Nous tenons à saluer leur expertise thématique et de terrain, avec une pensée particulière pour les préleveurs, observateurs du phytoplancton, analystes et saisisseurs des résultats dans la base de données.

Un grand merci à Nadine Neaud-Masson, qui seconde admirablement la coordination nationale du Rephy-Rephytox. Merci à Maud Lemoine, qui a repris en 2017 cette coordination avec du respect pour le travail déjà accompli.

Encore un immense merci à Anne Daniel qui assure l'expertise du Rephy sur l'hydrologie avec brio et une infinie bienveillance, tout comme à Zouher Amzil pour son expertise sur les toxines, son soutien inconditionnel au Rephy-Rephytox et son optimisme contagieux.

Nous remercions grandement nos collègues qui ont permis la structuration des données Rephy-Rephytox, en particulier : Alain Le Magueresse, créateur du système d'information pour la surveillance du littoral, et Antoine Huguet qui en a poursuivi le développement avec talent, portant Quadrige aux niveaux national et international ; Gaétane Durand, Émilie Gauthier et Alice Lamoureux de la cellule

1. Tous les termes suivis d'un astérisque sont explicités dans le lexique en fin d'ouvrage.

d'administration Quadriga pour leur remarquable compétence et leur soutien en continu. Nous remercions également ceux qui ont rendu les données visibles et intelligibles, en particulier Benoît Beliaeff, initiateur des bulletins de la surveillance, et Alain Le Magueresse pour sa capacité à inventer des produits mettant en valeur les données Rephy. Enfin, nous sommes reconnaissants à l'ensemble des personnels du service Vigies, qui contribuent tous à en faire un lieu chaleureux, où il fait bon travailler.

Nous tenons à remercier particulièrement Isabelle Gailhard et Tania Hernández-Fariñas, qui ont chacune consacré leur thèse et trois années de leur carrière à l'analyse des données phytoplanctoniques et hydrologiques du Rephy, ainsi que leurs directeurs de thèse, en particulier Philippe Gros et Cédric Bacher, pour leurs questionnements scientifiques et leur éclairage en matière d'évolution et de perspectives.

Merci à nos collègues du laboratoire Dyneco-Pelagos, pour leur intérêt pour le Rephy et la multitude de projets mis en place pour le faire évoluer, spécialement Cédric Bacher, Annie Chapelle, Anne Daniel, Luis Lampert, Francis Gohin, Raffaele Siano. Un merci particulier à Alain Ménesguen pour son soutien indéfectible au Rephy depuis toujours.

Merci enfin à ceux qui ont apporté des suggestions et corrections à cet ouvrage, en particulier Isabelle Auby, mais aussi Éric Abadie, Jean-Pierre Allenou, Annie Chapelle, Valérie Derolez, Émilie Gauthier, Stéphane Guesdon, Francis Gohin, Luis Lampert, Nadine Neaud-Masson et Raffaele Siano.

L'acquisition des données du Rephy a bénéficié du soutien financier des agences de l'eau : Artois-Picardie, Seine-Normandie, Loire-Bretagne, Adour-Garonne et Rhône-Méditerranée-Corse. L'acquisition des données du Rephytox a bénéficié du soutien financier de la direction générale de l'Alimentation du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Catherine Belin
et Dominique Soudant

Préface

Le phytoplancton marin est aujourd'hui l'objet de très nombreuses attentions. Il est le premier maillon de la chaîne alimentaire, indispensable à la croissance et à la survie de l'ensemble des organismes marins. En fixant le CO₂, il contribue à la régulation du changement climatique. Il produit une grande partie de l'oxygène que nous respirons. Composé d'organismes réactifs à toutes les variations de l'environnement marin, il témoigne des changements du milieu, qu'ils soient naturels ou d'origine anthropique. Il peut en particulier révéler des dysfonctionnements majeurs des écosystèmes, tels que l'eutrophisation causée par des apports excessifs d'éléments nutritifs. Certaines espèces ont la faculté de produire des toxines qui contaminent la chaîne alimentaire au risque d'affecter le consommateur de fruits de mer.

Depuis les années 1970, l'Ifremer observe le phytoplancton dans le milieu marin. Cette observation, d'abord locale et à vocation scientifique, s'est ensuite structurée dans le réseau national Rephy officiellement créé en 1984. Le Rephy observe donc le phytoplancton microscopique, mais aussi les toxines que ce plancton produit et que l'on retrouve dans les fruits de mer, et tous les paramètres physico-chimiques nécessaires à l'interprétation des données. Le Rephy est un réseau pionnier et exemplaire à plusieurs titres :

- il combine observation scientifique et missions réglementaires de prévention sanitaire et d'évaluation de la qualité environnementale du milieu ;
- il a su évoluer dans le temps pour satisfaire des exigences croissantes, avec l'évolution de la réglementation sanitaire, avec la mise en place de la directive-cadre européenne sur l'eau (DCE*) puis de la directive-cadre stratégie pour le milieu marin (DCSMM*) ;
- il alimente une recherche de pointe, fondamentale comme appliquée, dont résulte une abondante littérature scientifique ;
- ses données sont disponibles à tous, très rapidement après leur collecte, et cela depuis de nombreuses années.

Cet ouvrage décrit pour la première fois le Rephy dans son intégralité et illustre les résultats obtenus en 30 ans d'observation rigoureuse et coordonnée. Son auteure principale, Catherine Belin, a consacré 30 années de sa vie professionnelle à piloter et à faire évoluer ce réseau, avec une conviction et une énergie qui forcent mon admiration. En 2018, le Rephy reste un réseau phare de l'Ifremer et contribue à l'Infrastructure de recherche littorale et côtière (Ilico), intégrée dans la feuille de route nationale des infrastructures de recherche.

Jérôme Paillet

Directeur du département océanographie
et dynamique des écosystèmes à l'Ifremer
22 juin 2018

Introduction

Le terme « phytoplancton », qui est un terme générique et non valide d'un point de vue classification des êtres vivants, englobe des organismes appartenant essentiellement aux règnes Chromista et, pour certains, Bacteria, selon la classification à sept règnes de Ruggiero *et al.* (2015). Une définition simple et pratique peut cependant en être donnée, comme l'ensemble des algues microscopiques unicellulaires et des cyanobactéries photosynthétiques qui flottent dans les eaux. Cette définition a l'avantage de poser les critères importants de ce que l'on appelle phytoplancton : une seule cellule, photosynthétique, non fixée, très peu mobile par elle-même.

Il existe plusieurs milliers d'espèces phytoplanctoniques (De Vargas *et al.*, 2015). Certaines d'entre elles peuvent proliférer de façon soudaine et massive en formant parfois des « eaux colorées », rouges, brunes ou vertes selon la couleur des pigments contenus dans les cellules (photo 1). Si les proliférations, encore nommées efflorescences ou désignées sous le nom anglo-saxon de *blooms*, sont excessives ou trop fréquentes, on parle d'eutrophisation. Ce phénomène peut être observé dans tous les milieux aquatiques, eaux douces ou marines, et est défini de la façon suivante dans Pinay *et al.* (2017) :

« L'eutrophisation des écosystèmes aquatiques est une succession de processus biologiques enclenchés en réponse à un apport excessif de nutriments. Elle peut être progressive ou brutale. Les effets les plus notables sont des proliférations de producteurs primaires (plantes aquatiques, algues, cyanobactéries), des phénomènes de toxicité ou d'anoxie (absence d'oxygène), des pertes de biodiversité ».



Photo 1. Eaux vertes en baie de Bourgneuf (Loire-Atlantique), suite à une efflorescence de *Lepidodinium chlorophorum* (classe des Dinophyceae), 1^{er} août 2014.

Pour ce qui est du phytoplancton, en fin de bloom, la décomposition des cellules mortes peut entraîner une diminution brutale d'oxygène dans le milieu (hypoxie), voire sa disparition (anoxie), provoquant alors des mortalités parmi la flore et la faune marine. Il s'ensuit, entre autres, une dégradation de la diversité animale et végétale, ainsi qu'une perturbation des usages des écosystèmes marins. D'autres phénomènes plus ponctuels peuvent également être observés.

Certaines espèces phytoplanctoniques produisent des substances toxiques, appelées phycotoxines — étymologiquement toxines algales (Lassus *et al.*, 2016). Une première catégorie concerne la production de toxines libérées dans le milieu marin (exotoxines), agissant directement sur la faune et la flore marine, et pouvant provoquer des mortalités massives parmi les organismes fixés ou peu mobiles. Elles sont appelées ichtyotoxines quand elles causent des mortalités de poissons. Une deuxième catégorie recouvre la production de toxines à l'intérieur des cellules de phytoplancton (endotoxines) : les organismes marins qui les ingèrent, par exemple les mollusques bivalves dont la nourriture inclut une forte proportion de phytoplancton, sont alors susceptibles d'intoxiquer les consommateurs de ces organismes. Une troisième catégorie concerne des espèces phytoplanctoniques qui émettent des toxines sous forme d'aérosols, potentiellement dangereux pour les promeneurs et baigneurs par leurs effets irritants. Un autre type de nuisance est la production de mousses ou de mucus, pouvant conduire dans les cas extrêmes à des mortalités parfois importantes de poissons ou autres organismes marins.

Toutefois, seule une petite proportion des espèces phytoplanctoniques est dangereuse pour la santé humaine ou pour d'autres espèces marines¹. Avant tout, le phytoplancton produit la quasi-totalité de la matière organique consommée par les animaux marins, en premier lieu par le zooplancton, les mollusques « filtreurs », les poissons herbivores, etc., eux-mêmes proies de divers prédateurs — dont l'homme. Seuls quelques animaux marins ne dépendent guère de la production phytoplanctonique, telles les espèces profondes des sites hydrothermaux alimentées par une production bactérienne chimiosynthétique. Pour toutes ces raisons, le phytoplancton est un indicateur crucial de l'état de la biodiversité marine. Il permet notamment d'évaluer la qualité du milieu en termes de potentialités nutritionnelles pour l'écosystème, mais aussi en termes de nuisances potentielles pour la faune et la flore, et pour les usagers du milieu marin.



Photos 2, 3 et 4. Cellules du phytoplancton vues au microscope optique. Mélange d'espèces.

1. En 1995, Sournia estimait à 2 % la proportion d'espèces toxiques dans la flore phytoplanctonique mondiale ; en 2016, Lassus *et al.* reconnaissent que cette proportion est difficile à estimer, tout en confirmant l'hypothèse d'une extension des proliférations toxiques et nuisibles.

Chapitre 1

Contexte

►► Quels « services » le phytoplancton procure-t-il ?

Flottant dans les eaux superficielles éclairées de l'océan, le phytoplancton (algues unicellulaires eucaryotes¹ et cyanobactéries²) utilise un processus métabolique complexe (la photosynthèse oxygénique) qui transforme l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrochimique pour scinder la molécule d'eau (avec libération d'oxygène) et synthétiser des composés organiques à partir du dioxyde de carbone (CO₂) et de nutriments minéraux (Fischer *et al.*, 2016). Cette production autotrophe fixe le CO₂ dans la biomasse et approvisionne en matière organique la quasi-totalité des organismes marins hétérotrophes³. Soulignons que la photosynthèse oxygénique fut « inventée » par les cyanobactéries il y a environ 2,4 milliards d'années (Soo *et al.*, 2017). Il s'agit d'une innovation fondamentale dans l'histoire de la vie sur Terre, notamment pour sa contribution à l'enrichissement en oxygène (O₂) de l'atmosphère de la planète (Lyons *et al.*, 2014), et aux conséquences afférentes pour l'évolution animale (Planavsky *et al.*, 2014 ; Reinhard *et al.*, 2016). Ainsi estime-t-on qu'il y a 800 millions d'années, l'ancêtre commun des animaux — vraisemblablement un eucaryote marin pluricellulaire bactériophage — serait apparu avec les débuts de l'oxygénation de l'océan. C'est au cours de « l'explosion cambrienne », il y a 540 millions d'années, que se développeront dans un océan bien oxygéné les formes modernes de la biodiversité (métabolisme aérobie, prédateurs carnivores de grande taille, etc.) (Erwin *et al.*, 2011 ; Sperling *et al.*, 2013).

Aujourd'hui, le phytoplancton produit près de la moitié de l'oxygène de l'atmosphère (celle-ci inclut 21 % d'O₂). Ce « service » est lié au processus de production primaire phytoplanctonique (NPP*), qui constitue l'apport essentiel de matière

1. Les eucaryotes rassemblent une partie des organismes unicellulaires et tous les organismes pluricellulaires (champignons, végétaux et animaux) ; la structure de la cellule eucaryote est caractérisée par un noyau entouré d'une membrane.

2. Les cyanobactéries appartiennent aux procaryotes ; ce groupe d'organismes unicellulaires rassemble les bactéries et les archées ; la cellule procaryote est relativement simple, dépourvue de noyau.

3. Par opposition aux autotrophes, les hétérotrophes — ici les animaux marins — sont incapables de synthétiser des composés organiques complexes.

organique aux réseaux trophiques marins. Ainsi la NPP est-elle un facteur dimensionnant de la production naturelle des poissons, mollusques et crustacés marins dont les pêcheries mondiales extraient chaque année 110 millions de tonnes⁴ (Zeller *et al.*, 2018). En 1998, Field *et al.* ont estimé la NPP de la biosphère à 105 GtC/an (gigatonnes de carbone par an). Presque la moitié (49 GtC/an) de cette production globale est attribuée au phytoplancton marin, qui compense sa relativement faible biomasse (très inférieure à 1 % de la biomasse photosynthétique totale de la planète) par un turnover rapide, de l'ordre de quelques jours. Selon Bar-On *et al.* (2018), cette forte productivité explique la « pyramide inversée » des biomasses de producteurs primaires (environ 1 GtC) et de consommateurs (environ 5 GtC) marins, le turnover des premiers étant globalement beaucoup plus élevé que celui des seconds, par exemple quelques années en moyenne chez les poissons.

Le transfert de la NPP aux consommateurs marins — en particulier aux poissons planctonophages — est le fruit d'un réseau d'interactions complexes, très éloigné du paradigme classique de la chaîne alimentaire phytoplancton-zooplancton-poissons. En majorité, les micro-organismes à la base des réseaux trophiques marins ne sont ni strictement autotrophes, ni strictement hétérotrophes, mais ils sont « mixotrophes », c'est-à-dire qu'une même cellule combine les deux modes de nutrition (Stoecker *et al.*, 2017). Les modalités de la mixotrophie sont très variées : entre autres, des bactéries planctoniques « photohétérotrophes » utilisent la photosynthèse anoxygénique, des nanoflagellés et dinoflagellés photosynthétiques phagocytent des proies, des flagellés microzooplanctoniques acquièrent la phototrophie en séquestrant de façon temporaire ou permanente des microalgues, etc. Ce remarquable foisonnement de stratégies concourt à stabiliser le réseau planctonique, à élargir l'accès à la consommation des bactéries — plus généralement à diversifier les voies d'entrée et de circulation du carbone et des éléments nutritifs dans le réseau — et il pourrait être un « portefeuille » de réponses à différents stress comme l'hypoxie ou la raréfaction de nutriments (Mitra *et al.*, 2014 ; 2016).

Enfin, le phytoplancton joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la « pompe biologique », en fixant le CO₂ atmosphérique qui sera transféré vers l'océan profond (diatomées mortes, etc.) où il sera séquestré pendant plusieurs siècles, contribuant ainsi à réguler le climat de la Terre (Tréguer *et al.*, 2018).

► Pourquoi observer et surveiller le phytoplancton ?

À l'échelle de l'océan mondial, la variabilité dans le temps et l'espace de la NPP reflète les influences combinées de facteurs physiques (par exemple : température, éclaircissement, dynamique et structures multi-échelles des masses d'eau, intensité de la stratification des eaux superficielles), biogéochimiques (par exemple : degré de disponibilité en nutriments et en éléments traces, voire colimitations complexes) et écologiques (par exemple : interactions au sein du réseau trophique pélagique).

4. Biomasse exprimée en « équivalent poids vif ».

Parmi les changements globaux qui s'amplifient depuis le début de l'ère industrielle, le réchauffement, l'acidification, la désoxygénation de l'océan et la diminution de la NPP sont des facteurs majeurs de stress pour les écosystèmes marins (IPCC, 2014). À cet égard, la connaissance de la dynamique du phytoplancton est primordiale pour anticiper les réponses du cycle du carbone aux émissions de CO₂ anthropogénique. Un peu moins du quart de ces émissions (23 %) ont été absorbées depuis 1900 par l'océan mondial (Le Quéré *et al.*, 2018), entraînant une atténuation de l'effet de serre. La dissolution du CO₂ a acidifié les eaux marines superficielles et désormais celles situées en profondeur (Perez *et al.*, 2018). Cela entraîne, parmi de nombreux autres impacts, un appauvrissement en carbonates, préjudiciable aux organismes qui élaborent des formations calcifiées (Gattuso *et al.*, 2015). Par ailleurs, plus de 90 % de l'excès de chaleur reçu par la planète depuis 1970 est stocké dans l'océan, environ 2/3 dans la couche entre 0 et 700 m et environ 1/3 au-delà (Gleckler *et al.*, 2016). La température moyenne des eaux marines superficielles augmente, diminuant leur densité, accroissant leur flottabilité et favorisant ainsi leur maintien en surface. Ce « renforcement de la stratification des eaux de surface » tend à y confiner le phytoplancton et à impacter différemment les communautés microalgales, selon qu'elles sont sous les basses ou sous les hautes latitudes, avec un risque de diminution globale de la NPP (Kwiatkowski *et al.*, 2017).

Pour la majorité des raisons qui ont été évoquées, le phytoplancton est l'objet d'observations à diverses échelles, indirectes (par exemple : observation de la « couleur de l'eau » par satellite) ou directes. Parmi les secondes figure classiquement l'observation de la variabilité de la composition taxinomique de la communauté planctonique, notamment les ensembles de données pluridécennales d'observation du plancton (phyto et zoo) produites depuis 1931 par le *Continuous Plankton Recorder* (CPR*), initialement déployé en mer du Nord, puis étendu à l'Atlantique nord-est et aujourd'hui à l'Atlantique nord et dans d'autres régions océaniques. À partir des années 1990, les questions soulevées par les changements des écosystèmes marins (eutrophisation, changements climatiques, détection de HAB* [*Harmful Algal Blooms*]) ont conduit à « faire parler » les séries à long terme du CPR pour caractériser la réponse de l'écosystème pélagique aux tendances de ces phénomènes (Hays *et al.*, 2005). Parmi les nombreux jalons de l'analyse statistique des séries du CPR, il convient de signaler la publication des deux résultats suivants :

- en 2005, la mise en évidence de l'augmentation (1958-2002) de l'abondance des « dinoflagellés » (un des deux groupes les plus importants du phytoplancton avec les diatomées), associée à la diminution de celle des diatomées (Leterme *et al.*, 2005) ;
- en 2007, la variabilité à long terme (quatre décennies) des efflorescences phytoplanctoniques à caractère toxique ou nuisible en Atlantique nord-est et en mer du Nord (Edwards *et al.*, 2006).

Après avoir posé les enjeux cruciaux de l'observation du phytoplancton, il convient de préciser quelles sont les questions prioritaires auxquelles il est nécessaire de répondre au regard des changements globaux et de l'effet des pressions environnementales et anthropiques⁵. Par ailleurs, l'augmentation et la meilleure prise en

5. Anthropique : d'origine humaine.

compte des phénomènes toxiques associés au phytoplancton font partie d'enjeux de santé publique non négligeables.

► Quels sont les enjeux prioritaires d'une observation du phytoplancton côtier ?

Les résultats des travaux de recherche nationaux et internationaux issus de l'analyse des données de réseaux d'observation du phytoplancton ont permis de dégager les objectifs principaux de l'observation du phytoplancton qui devait être menée par le RePHY dans le cadre de sa restructuration alors en cours (Hernández-Fariñas, 2015) :

- analyser les réponses du phytoplancton aux changements environnementaux ;
- mieux connaître les niches écologiques et les habitats ;
- détecter les variations de phénologie ;
- caractériser les traits et les groupes fonctionnels.

Ces objectifs ont également été considérés comme cruciaux dans le cadre de la création de l'Observatoire phytoplancton (observatoire interorganismes Ifremer-CNRS-Insu-Universités). Les argumentaires sous-tendant ces quatre objectifs sont détaillés ci-dessous.

Analyser les réponses du phytoplancton aux changements environnementaux

Les zones côtières sont particulièrement vulnérables aux pressions anthropiques (De Jonge *et al.*, 2002). Parmi les compartiments biologiques sensibles à ces pressions, le phytoplancton joue un rôle clé en influençant l'abondance et la diversité des autres compartiments biologiques. Les changements propres au phytoplancton peuvent affecter entre autres sa biomasse, sa diversité spécifique et la distribution biogéographique des espèces (Hernández-Fariñas et Bacher, 2015). Par ailleurs, les apports au milieu marin, liés aux activités humaines sur les bassins versants et combinés aux effets des changements climatiques, ont des conséquences multiples attribuables aux phénomènes d'eutrophisation (Cloern, 2001) :

- augmentation de la biomasse du phytoplancton et appauvrissement en oxygène dans les eaux de fond (Diaz et Rosenberg, 2008) ;
- modifications de la structure des communautés phytoplanctoniques en réponse aux variations des rapports azote/phosphore/silice (Philippart *et al.*, 2000) ;
- fréquence accrue des efflorescences d'algues (Hallegraeff, 1993) ;
- modification de la phénologie des communautés phytoplanctoniques (Leterme *et al.*, 2008).

La série de données sur le plancton la plus longue et la plus fournie en Europe, appelée « Helgoland Roads » et située dans l'archipel allemand d'Helgoland au sud-est de la mer du Nord, a débuté en 1962. Cette série a montré non seulement des changements à long terme dans l'abondance et la saisonnalité de divers organismes,

mais elle a également mis en évidence l'apparition de nouvelles espèces et des décalages du début des blooms de printemps après un automne et un hiver chauds⁶.

Ces modifications des communautés phytoplanctoniques ont des impacts à plus grande échelle sur la chaîne trophique ou sur la santé humaine. Les nombreuses études déjà réalisées sur l'analyse des changements du phytoplancton, que ce soit du point de vue de l'abondance globale, des proportions des principaux groupes taxonomiques, de la structure des communautés phytoplanctoniques et des fluctuations de l'abondance d'une espèce, montrent que ces changements sont le plus souvent corrélés à des facteurs environnementaux : température, salinité, nutriments. Comprendre les réponses aux changements et aux gradients environnementaux nécessite donc l'étude de plusieurs niveaux taxinomiques et fonctionnels à plusieurs échelles spatio-temporelles, ainsi que la confrontation des concepts écologiques aux observations *in situ* afin de développer des outils de gestion nécessaires à la réhabilitation et à la restauration des écosystèmes.

Mieux connaître les niches écologiques et les habitats

La niche écologique est définie comme la position occupée par une espèce dans son écosystème et par l'ensemble des conditions environnementales qui favorisent sa croissance. Les études portant sur la niche écologique permettent également de comparer plusieurs espèces et d'informer sur l'organisation de la communauté. Litchman *et al.* (2012) considèrent que la notion de niche écologique pourrait aider à prévoir les réactions des espèces du phytoplancton face aux divers facteurs de stress agissant simultanément. Trois ensembles de données bien connus (CPR, Helgoland Roads, Rephy) ont été analysés récemment pour la caractérisation de la niche des espèces du phytoplancton marin (Gebühr *et al.*, 2009 ; Grüner *et al.*, 2011 ; Irwin *et al.*, 2012 ; Hernández-Fariñas *et al.*, 2015). Deux caractéristiques souvent utilisées sont la position de la niche de l'espèce et son ampleur par rapport à des gradients environnementaux. La notion de niche, combinée aux traits biologiques qui définissent les stratégies de vie et réponses des espèces aux facteurs environnementaux, explique comment une grande diversité d'espèces peuvent coexister ou se succéder au cours du temps.

En particulier, les travaux de Hernández-Fariñas *et al.* (2015) s'appuient sur les données du Rephy pour analyser les positions occupées par les 35 taxons phytoplanctoniques les plus importants pour ce qui est de la fréquence d'occurrence et d'abondance le long du littoral français de la Manche et de l'Atlantique : ils ont montré que les variables environnementales, telles que la concentration en nutriments, la température de l'eau, l'irradiance et la turbidité, peuvent être considérées comme des facteurs clés contrôlant la dynamique du phytoplancton et influençant la structure de la communauté. Celle-ci a également été analysée et interprétée en termes de recouvrement de niche, de marginalité et de tolérance : par exemple, les genres *Skeletonema* et *Dactyliosolen* ont été identifiés comme respectivement le plus tolérant et le plus marginal. Globalement, les taxons spécialisés et marginaux présentent des valeurs de recouvrement plus faibles.

6. D'après le site Web de AWI (Alfred Wegener Institut).

Détecter les variations de phénologie

La phénologie est l'étude des variations périodiques du cycle de vie d'une espèce en relation avec les variations saisonnières du climat. Le phytoplancton, notamment sous les hautes latitudes, présente de fortes variations saisonnières caractérisées par des taux nets de croissance élevés pendant les périodes de conditions favorables, suivis d'un maximum d'abondance puis d'une diminution. Les espèces du phytoplancton ayant des niches différentes se succèdent dans le temps. La phénologie est souvent exprimée par la date à laquelle surviennent les efflorescences algales, leur amplitude et leur durée. Parmi les études menées sur la phénologie du phytoplancton, les données issues du CPR montrent des efflorescences plus précoces (trois semaines environ) des dinoflagellés *Ceratium*, *Prorocentrum* et *Dinophysis* en mer du Nord (Edwards et Richardson, 2004). La réponse phénologique des dinoflagellés à l'augmentation de la température n'est pas seulement physiologique, elle peut également répondre à une stratification plus précoce de la colonne d'eau. Au contraire, les diatomées sont probablement plus dépendantes de la longueur du jour ou de l'intensité lumineuse (Eilertsen *et al.*, 1995 ; Edwards et Richardson, 2004 ; Wiltshire *et al.*, 2008). La conséquence potentiellement la plus importante sur le fonctionnement des écosystèmes est la désynchronisation entre producteurs primaires et secondaires pouvant entraîner des effets en cascade qui se propagent jusqu'aux niveaux trophiques supérieurs. Ces effets sont actuellement peu documentés pour le phytoplancton.

Caractériser les traits et les groupes fonctionnels

Dès 1978, Margalef étudie l'influence de facteurs environnementaux, tels la turbulence et la disponibilité en nutriments, à la fois chez les différents groupes taxinomiques mais aussi chez les groupes fonctionnels du phytoplancton. Le modèle CSR (C : espèces compétitrices, S : tolérantes au stress, R : rudérales⁷), développé sur les plantes terrestres, a été appliqué à la classification d'espèces phytoplanctoniques d'après leur morphologie et leurs traits physiologiques (Reynolds, 1988). Ces traits biologiques incluent l'utilisation de la lumière, l'acquisition des ressources (comme les nutriments), la croissance ou encore la capacité à éviter le broutage (Litchman et Klausmeier, 2008). Kruk *et al.* (2010) considèrent qu'un regroupement des espèces fondé sur des caractéristiques morphologiques peut résumer la plus grande partie de la variabilité des propriétés fonctionnelles du phytoplancton. Weithoff (2003) propose au contraire que des traits tels que la taille de la cellule, le potentiel de fixation d'azote, la demande en silicate, la phagotrophie, la mobilité et la forme soient utilisés pour les caractériser. Obtenir une telle quantité d'informations pour chaque espèce reste néanmoins un enjeu majeur, d'autant que croiser celles-ci avec les données taxinomiques et avec les résultats des études sur la phénologie et les niches ouvrirait la voie à de nouvelles approches du fonctionnement des communautés phytoplanctoniques.

7. Poussant dans un milieu modifié à cause de la présence de l'homme (décombres, friches, etc.).