

La beauté insoupçonnée du phytoplancton de la molécule à l'espace

The unexpected beauty of phytoplankton, from molecule to space

François Lantoine¹

¹ Sorbonne Université, Observatoire Océanologique de Banyuls sur mer. France, lantoine@obs-banyuls.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de cet article, en mariant Science et Art, est d'illustrer à travers quelques exemples, la diversité de perception de la beauté des microorganismes phytoplanctoniques à des échelles d'observation allant de la molécule à l'espace

ABSTRACT. The aim of this article, by combining Science and Art, is to illustrate, through a few examples, the diversity of perceptions of the beauty of phytoplanktonic microorganisms at scales of observation ranging from the molecule to space.

MOTS-CLÉS. Plancton, Phytoplancton, art, microscopie optique, microscopie électronique, pigments, couleurs, fluorescence, télédétection spatiale.

KEYWORDS. Plankton, phytoplankton, art, optical microscopy, electron microscopy, pigments, colors, fluorescence, spatial remote sensing.

Lorsque l'on m'a sollicité pour écrire un article dans ce numéro spécial je ne voyais pas comment concilier mes activités de recherche avec un quelconque aspect artistique ! En tant que scientifique je n'avais jamais vraiment réfléchi à la relation qu'il peut y avoir entre ces deux domaines qui semblent, à première vue, éloignés l'un de l'autre. Je me suis alors souvenu d'une citation de H. Sorby (1877) utilisée en introduction d'un chapitre de ma thèse aux sujets de pigments photosynthétiques « *It would be difficult to find another series of colouring matters of greater beauty or with such remarkable and instructive chemical and physical peculiarities* ». Dans son article Sorby évoque sans complexe son ressenti sur la beauté de ces molécules. A l'époque il était permis de publier un article scientifique faisant référence à la beauté d'un fait observé. En l'occurrence il s'agissait de pigments rouges de cyanobactéries. De nos jours il n'est plus possible de publier un article scientifique faisant référence à des ressentis esthétiques, qui par définition sont subjectifs et donc non scientifiques. C'est là que la revue Arts et Sciences intervient en offrant un espace de liberté aux scientifiques et/ou artistes pour exprimer leurs ressentis sur des aspects esthétiques liés à leur travail. Ainsi, il m'est permis de partager avec le lecteur ma passion pour la beauté de la nature, en particulier celle des organismes phytoplanctoniques, sujets de mes recherches. L'objectif de cet article sera donc, à travers quelques illustrations, de dévoiler ma perception de la beauté de ces organismes en explorant diverses techniques nécessaires à leur étude. À travers cette présentation, j'aspire à démontrer au lecteur qu'il est possible de révéler la splendeur de ces organismes à des échelles aussi variées que la molécule ou l'espace, un cas exceptionnel en biologie.

Le phytoplancton (grec φυτόν / phutón, « plante » et πλαγκτός / planktós, « errant ») représente un ensemble diversifié et hétérogène de microorganismes photosynthétiques dérivants aux grès des courants dans les écosystèmes aquatiques. Ces organismes bien qu'unicellulaires occupent une place cruciale dans les écosystèmes en tant que producteur primaire à la base des réseaux trophiques (les chaînes alimentaires) et dans les grands cycles biogéochimiques à l'échelle du globe. Ils contribuent à environ la moitié de l'activité photosynthétique du globe (Field et al. en 1998), contribuant ainsi de manière significative à la régulation du climat en capturant le dioxyde de carbone lors de la photosynthèse grâce à leurs pigments photosynthétiques.

Ces organismes unicellulaires, composés d'algues et de cyanobactéries, révèlent une biodiversité et des morphologies étonnantes souvent d'une grande beauté, résultat d'une longue adaptation évolutive aux conditions environnementales depuis les origines de la vie. Pour explorer cette diversité, les scientifiques ont mis au point une multitude de techniques et d'outils, allant de la microscopie traditionnelle et électronique à la biologie moléculaire, en passant par les approches de télédétection. Ces méthodes mettent en lumière l'importance d'une approche multidisciplinaire, soulignant leur complémentarité pour une compréhension approfondie de ces microorganismes fascinants. La nécessité de cette diversité de techniques pour leur étude vient du fait que, bien que microscopiques, ces organismes se répartissent sur un large spectre de tailles, allant des plus petits d'environ 0,5 μm aux plus grands pouvant atteindre quelques millimètres (soit 4 ordres de grandeur), exigeant des outils et méthodes adaptés à chaque gamme de taille. Cet article explore quelques aspects de la richesse de ces méthodes en mettant en lumière la diversité des perspectives d'observation à différentes échelles. Chacune de ces échelles révèle une beauté inattendue, offrant ainsi un aperçu captivant de la diversité et de la complexité des microorganismes étudiés.

L'étude du phytoplancton a connu ses débuts avec l'utilisation des premiers microscopes. Néanmoins, l'intérêt pour le monde marin est ancestral. Des naturalistes grecs tels que Théophraste (vers 372 - 288 av. J.-C.) avaient déjà noté des changements de couleur de la mer, voire des scintillements visibles la nuit, phénomènes qui ont depuis été expliqués par des proliférations algales colorées, donnant lieu aux célèbres marées rouges, ou à des manifestations de bioluminescence. Cependant, il a fallu attendre l'invention du microscope pour élucider l'origine de ces phénomènes par la découverte d'organismes invisibles à l'œil nu : les microorganismes.

1. La microscopie : découverte d'un univers invisible à l'œil nu

La microscopie demeure une méthode incontournable pour étudier le phytoplancton. L'observation directe des cellules permet d'identifier les espèces, de mesurer leur taille, de caractériser leur morphologie et leur couleur afin de déterminer leur taxonomie. En microscopie on distingue classiquement deux techniques distinctes : la microscopie optique, qui utilise la lumière, et la microscopie électronique, où la lumière est remplacée par un faisceau d'électrons.

1.1. La microscopie optique : une vision classique mais colorée !

Le XVII^e siècle a marqué l'avènement des premiers microscopes, ouvrant ainsi une nouvelle ère dans la découverte et l'observation des microorganismes. Le naturaliste Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723), fut l'un des premiers à observer des organismes unicellulaires, jetant ainsi les bases d'une exploration toujours plus détaillée jusqu'à nos jours (Leeuwenhoek 1673, 1677). La fin du XIX^e siècle a constitué un tournant dans l'étude du phytoplancton avec le développement de techniques de microscopie améliorées, ouvrant ainsi la voie à une meilleure compréhension de la morphologie et de la diversité de ces organismes. Ainsi le zoologiste allemand Ernst Haeckel (1834-1919), l'un des fondateurs de l'écologie, a significativement contribué à la description et à l'étude de nombreuses espèces de microorganismes, comme l'a déjà exposé mon collègue John Dolan dans cette revue (2019, 2023). Fasciné par la beauté de ces microorganismes, Haeckel a laissé des planches dessinées magnifiques, témoignant d'une fusion réussie entre l'art et la science (Haeckel 1862, 1893, 1899-1904), même s'il n'avait pas conscience, à l'époque, de l'importance écologique de ces organismes.

La microscopie optique demeure une technique simple offrant l'avantage d'observer des organismes vivants et de percevoir la couleur des cellules. Il est, par exemple, possible d'observer les petites cellules phytoplanctoniques des dinoflagellés effectuer leur danse tourbillonnante sous l'objectif du microscope. On peut également discriminer les algues brunes, vertes ou rouges en fonction de leurs pigments. De nombreuses découvertes et recherches ont été publiées grâce à cette technique, qui demeure encore largement utilisée de nos jours. Je partagerai ici seulement quelques clichés optiques de ces algues (Fig. 1), afin de laisser la place à mon collègue Laurent Intertaglia (voir ce numéro) pour

présenter ses superbes photographies, en complément de l'article d'Ian van IJken, également paru dans cette revue (IJken 2022).

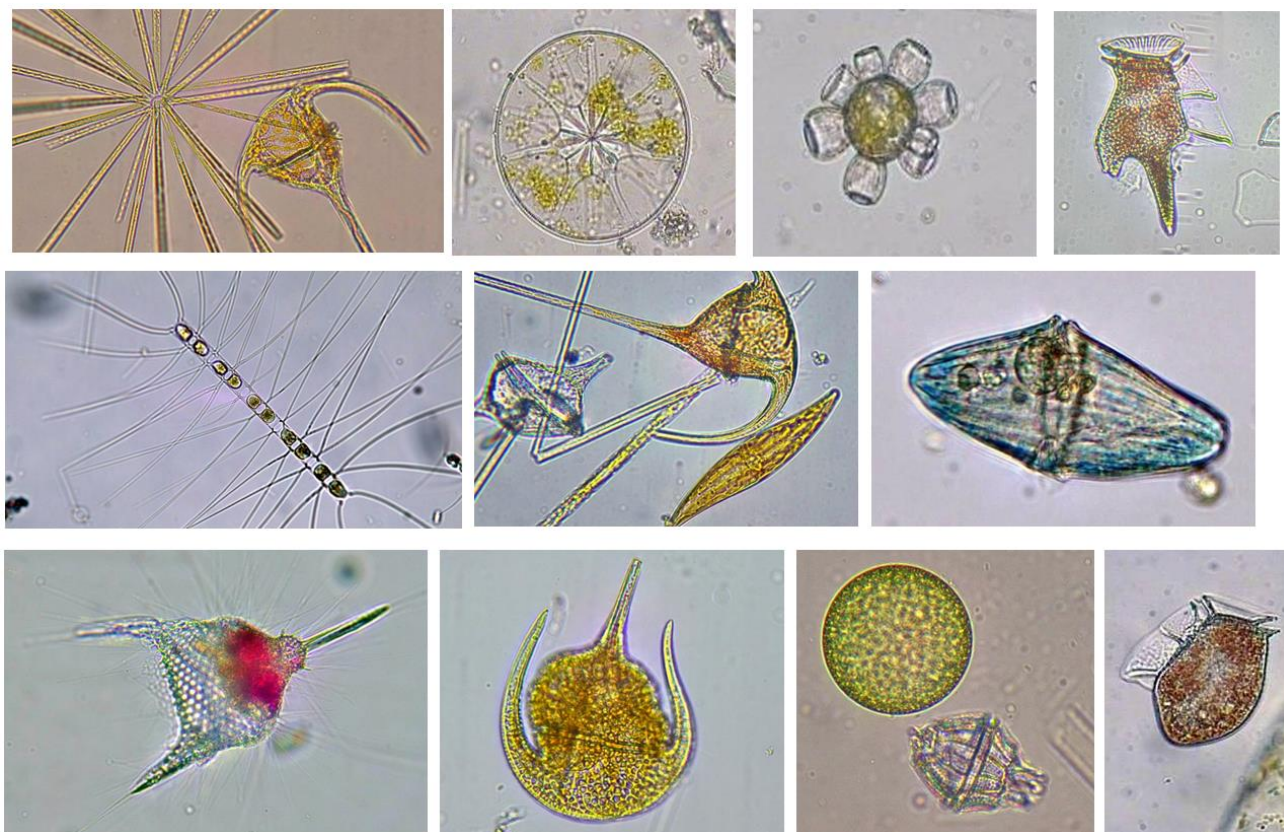


Figure 1. Aperçu de la diversité des formes et des couleurs naturelles de quelques microorganismes planctoniques observés en microscopie optique (différents grossissements).

Un autre avantage du microscope optique réside dans la possibilité de manipuler et d'agencer délicatement des cellules sur des lames de microscope. Ainsi, avec une grande patience et dextérité, des naturalistes passionnés à la fin de l'ère victorienne en Angleterre ont créé de véritables micro-mosaïques, visibles uniquement sous microscope, en associant artistiquement des cellules de diatomées, dont les parois siliceuses ornementées sont souvent considérées comme des bijoux microscopiques. L'un des artistes scientifiques les plus connus du XIXe siècle était Johann Dietrich Möller (1844-1907), qui a perfectionné l'art de disposer les diatomées sur des lames de microscope. Bien qu'il gagnait sa vie en vendant ces lames, il attachait également de l'importance à ce que ses travaux soient publiés parmi les experts. Depuis, des photographes spécialiste de la microphotographie, ont pu immortaliser et partager la beauté de ce travail, à l'instar des photographies du biologiste Matthias Burba (2008, 2009), lauréat à plusieurs reprises du concours de microphotographie Nikon's Small World en 2007 et 2008 (Fig.2).

Cette forme d'art microscopique au service de la science, qui avait presque disparu, a été récemment explorée par Klaus Kemp, un autre chercheur et artiste mondialement connu décédé en 2022 (une biographie rédigée par Linda Medlin en 2023 est accessible sur le site de The International Society for Diatom Research). Scientifique de formation, Kemp a consacré sa vie à explorer le monde microscopique, utilisant son expertise pour créer des œuvres d'art éblouissantes composées de micro-mosaïques, associant à des diatomées, des écailles de papillons ou d'autres particules microscopiques. Le lecteur intéressé trouvera une illustration du travail de Klaus Kemp ainsi qu'une vidéo sur le site <http://experimentwithnature.com> en cherchant « the-diatomist ».

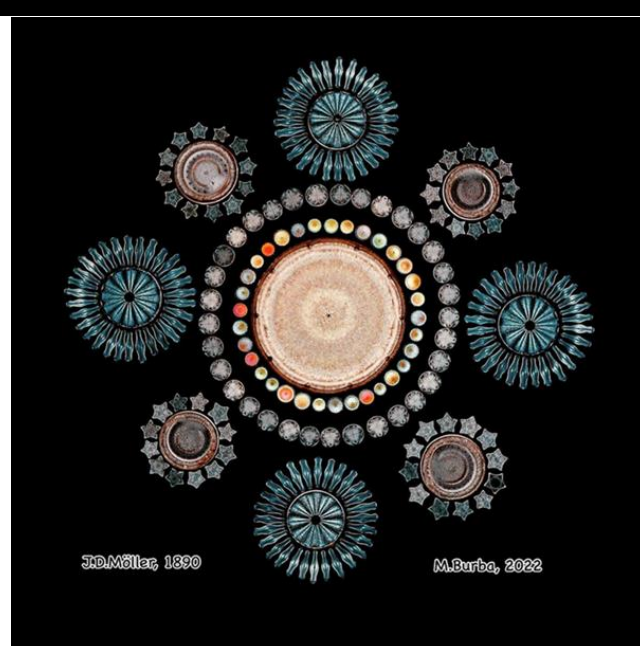
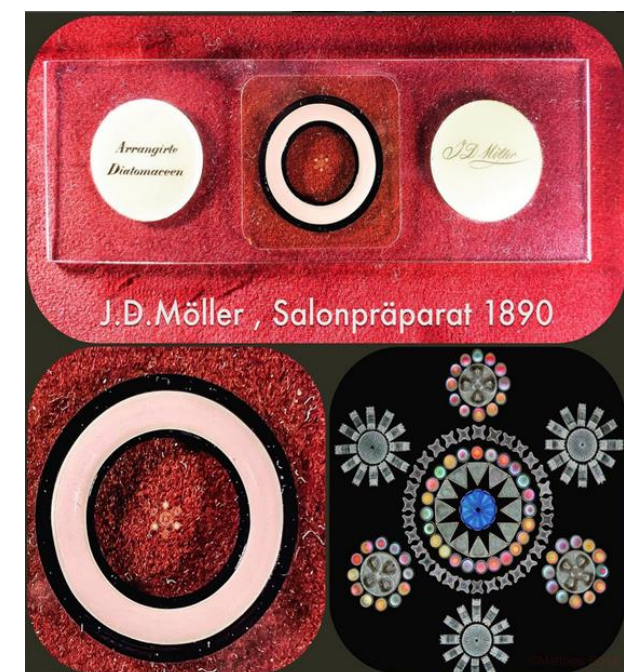


Figure 2. Microphotographies de Matthias Burba prises à partir de lames microscopiques d'arrangements de cellules de diatomées réalisées par J.D. Möller en 1890. Photo bas gauche primée lors du concours de microphotographie Nikon's Small World de 2007. Ces œuvres d'art sont contenues sur une lame de microscope dans un espace de quelques millimètres. Ces arrangements géométriques minutieux des parois cellulaires se font sous microscope. Les couleurs observées ne sont pas les couleurs propres de cellules mais des couleurs de diffraction et réflexion de la lumière sur les parois de silice des cellules (champ obscur, agrandissement 65x).

Ce qui impressionne dans ces micro-tableaux, outre le travail d'arrangement géométrique des cellules, ce sont leurs couleurs extraordinaires. Ces couleurs brillantes et iridescentes ne proviennent pas de la couleur propre des cellules, mais des jeux d'interférences et de diffraction de la lumière sur leurs parois siliceuses. Ces phénomènes d'interférences et de diffractions sont liés à la nature ondulatoire de la lumière, expliquant par exemple les reflets colorés à la surface d'un CD ou des plumes de paon.

Bien que la microscopie optique demeure largement employée pour l'observation de grandes cellules (de l'ordre de dizaines à centaines de μm), ses capacités atteignent leurs limites avec les cellules de taille nano (2 à 20 μm) ou picoplanctoniques (0,5 à 2 μm). Pour mieux appréhender ces unités de petite

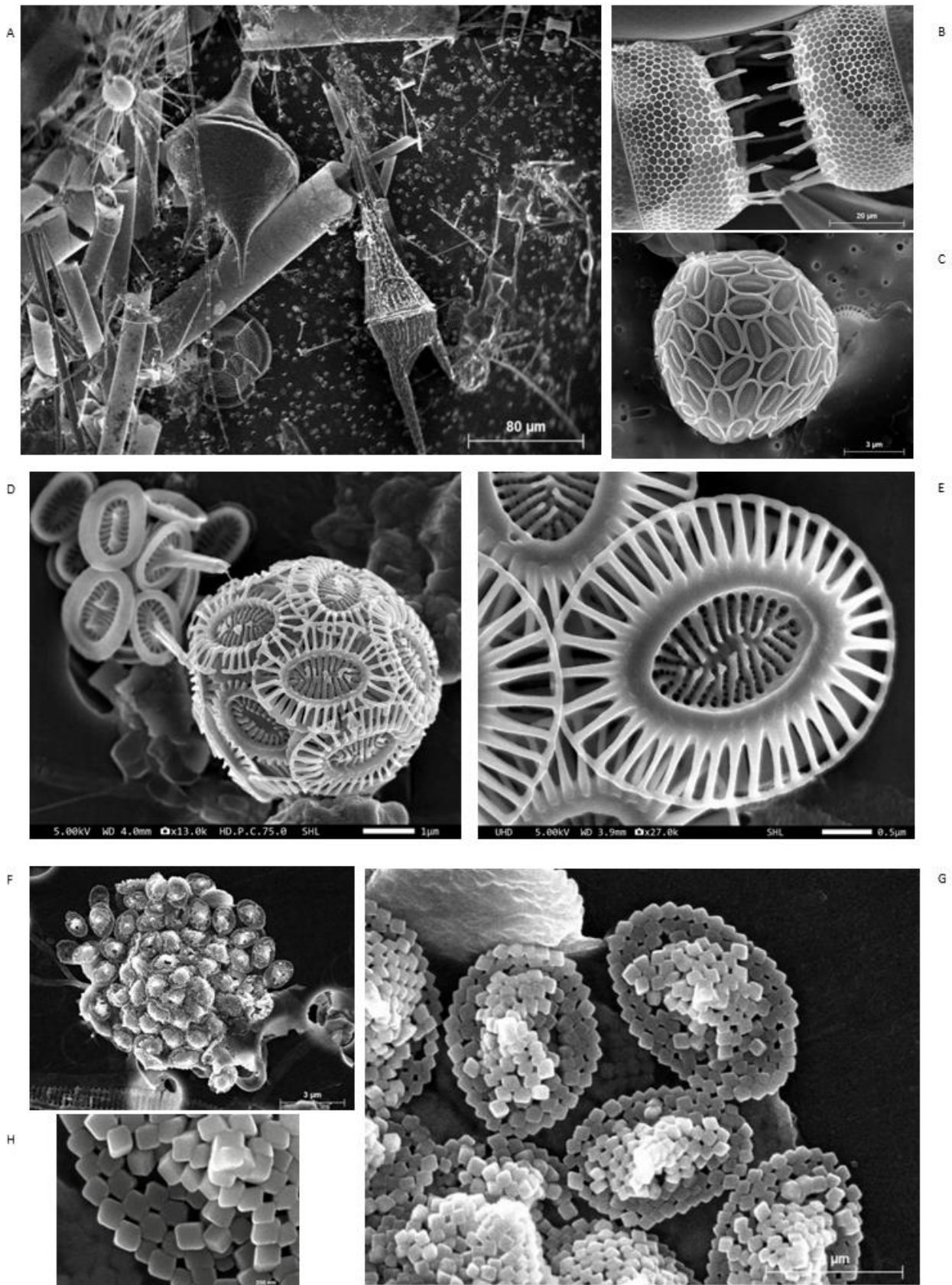
taille, il est utile de rappeler que le μm correspond à un millième de millimètre (10^{-6} m) ; par exemple, l'épaisseur moyenne d'un cheveu fin est d'environ $100\ \mu\text{m}$. Les limitations de la microscopie optique découlent de la résolution limitée par les longueurs d'onde de la lumière, avec un grossissement maximal de $\times 1000$. Pour l'observation de cellules plus petites, l'utilisation de la microscopie électronique est nécessaire.

1.2. La microscopie électronique : révéler la beauté à l'échelle infinitésimale

L'histoire de la microscopie électronique remonte au début du XXe siècle, une époque où les scientifiques atteignaient les limites de la résolution optique des microscopes traditionnels. L'idée d'utiliser des faisceaux d'électrons pour augmenter la résolution a émergé dès les années 1920, et le premier prototype de microscope électronique a été réalisé en 1931 par les ingénieurs allemands Ernst Ruska et Max Knoll (1931). Lauréat du prix Nobel de physique en 1986, Ruska a employé des faisceaux d'électrons à la place de la lumière pour former des images, exploitant la courte longueur d'onde des électrons par rapport à celle de la lumière visible. Cette approche a considérablement amélioré la résolution et le grandissement, atteignant des niveaux pouvant dépasser le million.

En fonction du type de microscope (à balayage ou par transmission), il devient possible d'explorer soit la structure extérieure des parois cellulaires, soit l'ultrastructure interne des cellules. Les agrandissements obtenus sont bien au-delà de ce que permet la microscopie optique, offrant la possibilité d'effectuer des observations à l'échelle du nanomètre (10^{-9} m), voire même à quelques angströms (10^{-10} m). Nous pénétrons ainsi dans une nouvelle dimension qui nous permet d'explorer la beauté du phytoplancton à une échelle infinitésimale, dévoilant une structure cellulaire aussi organisée qu'esthétiquement belle. En explorant le monde de l'infiniment petit, cette technologie dévoile des détails complexes, des motifs et des structures magnifiques qui émerveillent et questionnent les scientifiques tout en captivant l'imagination. La Figure 3 illustre quelques exemples de la beauté artistique et scientifique de quelques algues phytoplanctoniques en microscopie électronique à balayage (MEB). Lors d'une séance d'observation au MEB, il est habituel de passer plusieurs heures dans une pièce obscure sans se rendre compte du temps qui passe, perdu dans une autre dimension, un autre univers pourtant contenu dans quelques centaines de μm^2 ! Lors de mes cours, je suis toujours ravi de voir l'étonnement, voire l'excitation, des étudiants qui découvrent pour la première fois la richesse et la beauté de ce monde microscopique. Il est important de noter qu'à la différence du microscope optique, les photographies prises en microscopie électronique sont en noir et blanc, car elles résultent de l'impression d'un capteur par des électrons sans couleur. Cependant, lors d'expositions artistiques ou sur Internet, il est fréquent de rencontrer des images colorisées artificiellement, renforçant ainsi la beauté des structures observées et élevant à nouveau la beauté microscopique au statut d'œuvre d'art. La diversité entre ces cellules découle principalement des variations dans la composition de leurs parois cellulaires, qui jouent un rôle crucial dans leur structure, leur fonction et leur interaction avec l'environnement. On peut schématiquement distinguer trois grandes catégories de compositions des parois cellulaires : celles en silice, formant le frustule caractéristique des diatomées, une sorte de boîte en verre protégeant la cellule et composée de deux valves ; celles en carbonate de calcium, typiques des Coccolithophorides ; et celles de nature organique (cellulosique), comme chez les Dinoflagellés. Au sein de chacun de ces groupes, on observe une très grande diversité d'organisation ou d'agencement de ces parois, démontrant l'imagination infinie de la nature.

La microscopie électronique, révélant l'infinie beauté du monde microscopique, propose une expérience visuelle qui transcende la simple observation scientifique (Fig 3). Des sculptures nanométriques, telles que l'agencement des microcristaux de carbonate de calcium (Fig 3 H) constituant les coccolithes (Fig 3 E, G) petits boucliers recouvrant les cellules (Fig 3 C, D), aux étoiles aux formes et compositions diverses (Fig 3 K, L, M), en passant par le "regard étonné" d'une petite diatomée (Fig 3 J), ces images célèbrent la majesté de l'infiniment petit. En unissant l'art et la science, la microscopie électronique nous invite à contempler la beauté insoupçonnée qui existe au cœur même de notre réalité.



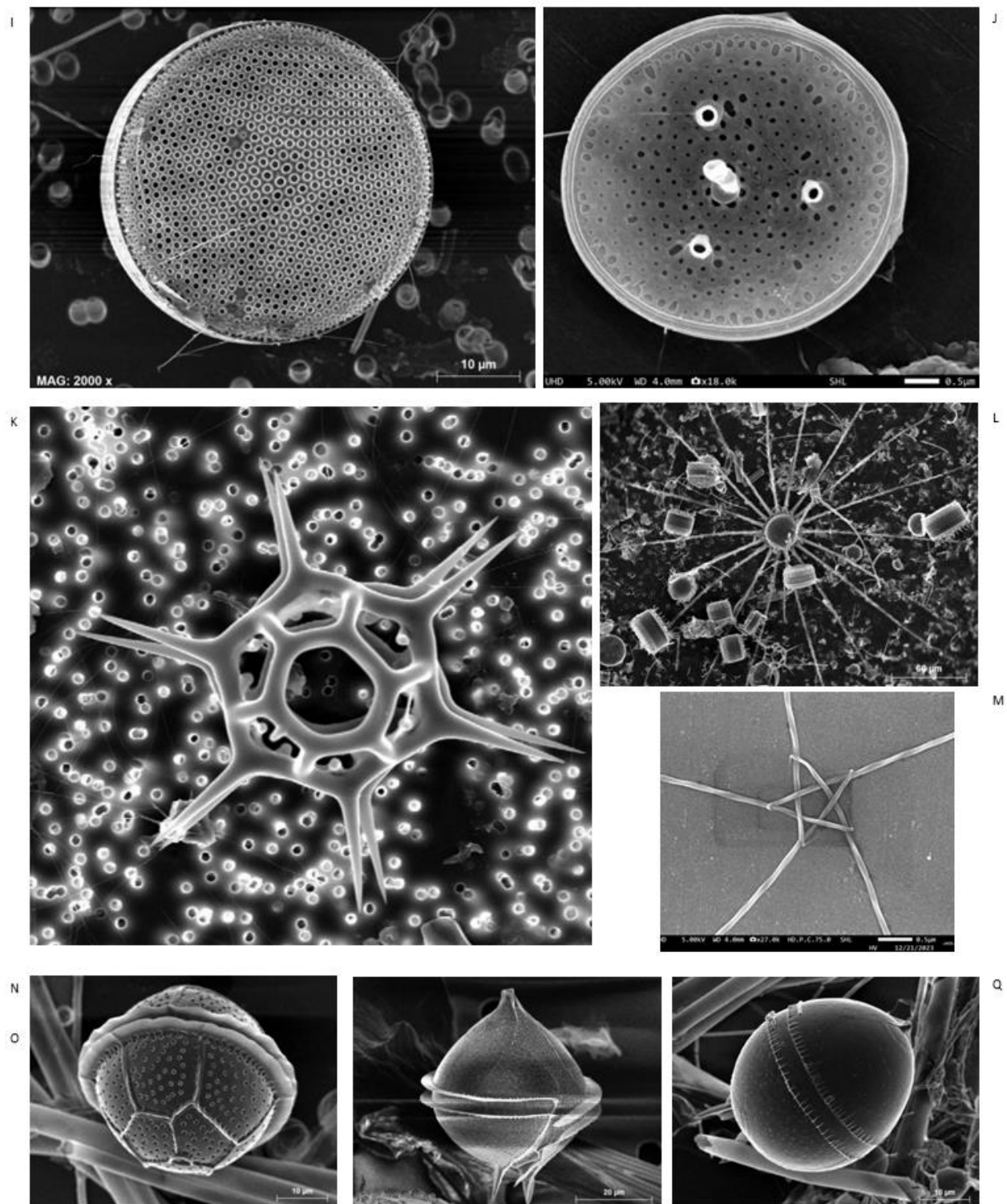


Figure 3. Microphotographies en microscopie électronique à balayage à différents grossissements. A) Vue générale d'un échantillon B) jonction entre deux cellules de diatomée (*Stephanopyxis* sp.) C, D) Cellules de coccolithophorides. E) Détail d'un coccolithe (plaque calcaire ornementée recouvrant la cellule) F,G,H) Cellule de coccolithophoride vue à des grossissements croissants : F) cellule entière, G) vues des coccolithes, H) détail de la structure fine d'un coccolithe montrant l'agencement des micro-cristaux de carbonate de calcium. I,J) frustule de diatomées. K,L,M) Illustration de la diversité de formes étoilées au sein de la communauté phytoplanctonique : K) squelette en silice d'une cellule de silicoflagellé (*Dictyocha* sp.) , L) cellule de diatomée coloniale entourée de longues soies en silice (*Bacteriastrum* sp.), M) étoile à 5 branches en chitine produite par des cellules de *Phaeocystis* sp. (Le rôle de ces étoiles éjectées dans le milieu extérieur reste discuté). M,N,O) trois exemples de cellules de Dinoflagellés avec des parois cellulaires cellulosiques plus ou moins épaisses et ornementées.

Alors que le microscope électronique nous a permis de découvrir le monde infinitésimal en pénétrant dans l'intimité des cellules, nous nous approchons désormais de leurs composantes moléculaires, ouvrant ainsi la voie à la poursuite de notre exploration vers des techniques d'étude du phytoplancton à l'échelle des molécules.

2. Le phytoplancton à l'échelle moléculaire

Le 21^e siècle a marqué l'avènement de techniques révolutionnaires en biologie moléculaire pour l'étude du phytoplancton. L'ADN environnemental a ouvert la voie à l'exploration de la diversité génétique du phytoplancton directement dans les échantillons d'eau. Si la structure tridimensionnelle de la molécule d'ADN en double hélice, découverte par Watson et Crick en 1953, est elle-même une œuvre d'art de la nature, d'autres molécules jouent un rôle clé en océanographie, notamment les pigments photosynthétiques. Ces molécules colorées permettent aux organismes de capturer l'énergie lumineuse pour convertir le dioxyde de carbone et l'eau en molécules organiques lors du processus de photosynthèse, entraînant la libération d'oxygène. Ce sont ces molécules qui confèrent leurs couleurs aux algues et parfois à la mer lorsqu'elles prolifèrent en abondance lors d'efflorescences (bloom). On distingue généralement trois grandes familles de pigments photosynthétiques : les pigments chlorophylliens verts, les caroténoïdes aux teintes orange et jaune, et les phycobiliprotéines comprenant des pigments rouges (phycoérythrines) ou bleus (phycocyanines). C'est cette palette de couleurs des pigments, couvrant tout le spectre de la lumière visible, qui a permis à ces organismes de coloniser différentes niches lumineuses, tant dans les environnements aquatiques que terrestres.

Ainsi, dans une algorithme (pièce où les conditions de température et de lumière sont contrôlées pour cultiver des algues), toutes les nuances sont présentes, depuis le bleu, le vert, le jaune, l'orange et le rouge, comme illustré dans l'algorithme LECOB (Laboratoire d'Ecogéochimie des Environnements Benthiques) du laboratoire Arago (Fig 4 A). En océanographie, grâce à ces pigments spécifiques et abondants, il devient facile de quantifier et de caractériser la diversité des algues présentes dans le milieu. Différentes techniques sont utilisées pour mesurer ces pigments. La plus ancienne est la spectrophotométrie, qui repose sur la mesure des propriétés d'absorption spécifiques de la lumière. Après filtration de l'eau de mer et extraction du filtre dans un solvant adapté en fonction du type de pigments, il est possible de caractériser leurs couleurs et de les quantifier par des mesures d'absorption à différentes longueurs d'onde. Cependant, une autre technique, plus sensible, est également fréquemment utilisée. Elle repose sur la remarquable capacité de certains pigments, en sus de leur couleur propre de réflexion, à fluorescer. La fluorescence est la capacité de réémettre de la lumière instantanément après une excitation lumineuse. Ce processus permet à ces molécules d'éliminer le trop-plein d'énergie absorbée. Tout comme les propriétés d'absorption de la lumière, la fluorescence est également spécifique à chaque catégorie de molécules. Par exemple, les chlorophylles, pigments verts, vont fluorescer dans le rouge, tandis que les phycoérythrines, pigments rouges, vont fluorescer dans l'orange. Lorsqu'un échantillon est suffisamment concentré, en jouant sur l'angle d'excitation de la source de lumière et l'angle d'émission de fluorescence, il devient possible de voir à l'œil nu ces deux couleurs qui se combinent naturellement dans le même échantillon (Fig 4 B, C, D, E). Ainsi, une même molécule peut apparaître verte ou rouge, rouge ou orange, selon les conditions d'observation.



Figure 4. A) Algorithme LECOB de l'observatoire océanologique de Banyuls sur mer donnant un petit aperçu de la diversité des couleurs de quelques espèces d'algues et cyanobactéries. B) Echantillon de phycoérythrine en lumière transmise montrant la couleur rose du pigment. C) même échantillon en lumière indirecte montrant sa fluorescence orange. D et E) échantillons de phycoérythrine et chlorophylle montrant leurs couleurs respectives de réflexion (haut du tube) et d'émission de fluorescence (bas du tube) rose/orange pour la phycoérythrine ; vert/ rouge sombre pour la chlorophylle.

Ces méthodes de dosage des pigments sont largement utilisées en océanographie, car elles offrent la possibilité de quantifier rapidement l'abondance (la biomasse) du phytoplancton, évitant ainsi le comptage fastidieux des cellules au microscope. Il est à noter que la cytométrie en flux, une technique similaire, est également fréquemment utilisée en océanographie. Elle permet de compter et de caractériser rapidement les cellules du phytoplancton en combinant des observations microscopiques avec l'enregistrement des propriétés de diffusion et de fluorescence de la lumière des cellules.

Plus fascinant encore, explorons à présent comment ces molécules colorées à l'intérieur des cellules nous ouvrent les portes de l'espace. En raison de l'abondance significative de ces cellules

phytoplanctoniques (atteignant plusieurs millions de cellules par litres), elles ont le pouvoir de modifier la couleur de la mer, des lacs (et même des piscines !) lors d'efflorescences. Ainsi, il est aujourd'hui possible de détecter le phytoplancton depuis l'espace grâce à la télédétection.

3. Le phytoplancton vu de l'espace, la beauté céleste capturée

Au milieu du XXe siècle, l'utilisation de la télédétection, qu'elle soit aérienne ou spatiale, a connu une expansion fulgurante dans les domaines continentaux, marins et atmosphériques. Les images satellites offrent des mesures inédites sur des caractéristiques telles que la température, la couverture nuageuse, les proliférations phytoplanctoniques, et bien d'autres paramètres, à des échelles spatiales considérables. Ces cartes permettent ainsi une mesure précise de la couleur des océans, associée à la présence de chlorophylle et d'autres pigments photosynthétiques en surface. Elles aident les scientifiques à décrypter les variations saisonnières, les phénomènes de bloom et les réponses du phytoplancton aux changements environnementaux.

Des organismes tels que la NASA (<https://earthobservatory.nasa.gov>) et l'Agence Spatiale Européenne (ESA <https://www.esa.int>) offrent aux scientifiques et au grand public des observations de haute résolution de notre planète. Étonnamment, au fil du temps, ces captures ont transcendé leur utilité scientifique pour devenir des œuvres d'art à part entière, révélant une beauté étonnante de notre planète vue de l'espace. Ces clichés, bien plus que de simples captures scientifiques, transmettent une poésie visuelle qui éveille l'admiration pour la planète.



Figure 5. Photo satellites de la chlorophylle montrant la prolifération et distribution des organismes phytoplanctoniques visibles depuis l'espace. Ces efflorescences s'étendent sur des centaines, voire des milliers de kilomètres. Gauche : Photo Landsat 8 (juillet 2018) de tourbillons vert phytoplanctoniques dans le Golf de Finlande. NASA Earth Observatory images by Joshua Stevens and Lauren Dauphin, using Landsat data from the U.S. Geological Survey. Droite : Bloom phytoplanctonique en Mer Baltique. Photo de l'Agence Spatiale Européenne mission Copernicus Sentinel-2. Image capturée le 20 July 2019, processed by ESA, CC BY-SA 3.0 IGO <https://www.esa.int/eseach?q=phytoplankton+bloom>

Les images satellite utilisent souvent une palette de couleurs saisissantes pour représenter différentes caractéristiques de la surface terrestre. Lorsqu'on contemple des photos satellites de l'océan montrant des blooms phytoplanctoniques, on ne peut qu'être étonné ou émerveillé par ces mélanges de couleurs, cette diversité des formes géométriques, ces volutes, spirales, tourbillons de chlorophylles liés aux courants marins, rappelant les tableaux de Van Gogh (Fig 5). Ces observations, réalisées sur des

échelles de centaines voire de milliers de kilomètres carrés, nous permettent de clore notre voyage de découverte du phytoplancton qui avait commencé sous l'objectif d'un microscope.

Conclusion

L'étude du phytoplancton est une histoire de curiosité scientifique, ponctuée de découvertes passionnantes, alimentée en permanence par les avancées technologiques. Cette quête évolue avec l'émergence de la biologie moléculaire et de la modélisation, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour comprendre ce protagoniste essentiel de nos écosystèmes marins et terrestres. L'étude du phytoplancton est confrontée à des défis, tels que la compréhension des interactions complexes au sein des communautés et sa réaction aux changements climatiques. Les progrès technologiques, associés à une approche multidisciplinaire, continueront d'enrichir notre perception de ce monde microscopique essentiel à la vie marine. Une particularité remarquable de cette exploration réside dans la diversité des techniques et des outils utilisés, couvrant des échelles d'étude allant de la molécule à l'espace. À travers quelques exemples de ce voyage scientifique, j'espère avoir dévoilé une vision inattendue de la diversité fascinante de ces microorganismes, contribuant ainsi à fusionner l'art et la recherche à travers leur extraordinaire beauté.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude envers M. Yonko Gorand, Ingénieur de recherche à l'UPVD et responsable de la plateforme de microscopie électronique EnRMAT, pour son précieux soutien et ses conseils éclairés lors de l'utilisation du microscope électronique à balayage au sein du Centre de Caractérisation de la Matière PROMES/CNRS.

Bibliographie

- Burba, M 2008. Die größte Typenplatte der Welt und ihre Herstellung Mikrokosmos, Zeitschrift für Mikroskopie 97 (2008), 321-327. https://www.zobodat.at/pdf/Mikrokosmos_97_6_0001.pdf
- Burba M. 2009. Mikroskopische Salonpräparate - Naturschönes und Kunstschönes auf kleinstem Raum. Mikrokosmos 98 (2): 70-75
- Burba, M 2007. Concours de microphotographie Nikon's Small World de 2007. <https://www.nikonsmallworld.com/galleries/2007-photomicrography-competition/arrangirte-diatomeen-1889-diatoms>
- Burba, M 2008. Concours de microphotographie Nikon's Small World de 2008. <https://www.nikonsmallworld.com/galleries/2008-photomicrography-competition/diatoms-from-an-1891-j.d.-moeller-arrangement>
- Dolan, John. 2019. Ernst Haeckel's Radiolarians and Medusa: The influence of his visits to Villefranche on his science and his art. Arts et sciences. 3. 10.21494/ISTE.OP.2019.0420. <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2019.0420>
- Dolan, John. 2023. Beauty of the plankton: from the first issue of Haeckel's Art Forms of Nature. Journal of Plankton Research, Volume 45, Issue 2, March/April 2023, Pages 235–238, <https://doi.org/10.1093/plankt/fbac076>
- ESA, European Space Agency. (2017). "Satellites Show Changes in Earth's Water and Ice Over 25 Years." European Space Agency. <https://www.esa.int/>
- Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., and Falkowski, P. 1998. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components, Science, 281, 237–240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>, 1998.
- Haeckel, E. 1862. Die Radiolarien (Rhizopoda Radiaria). Eine Monographie. Vol. 572p, Vol. 2 Atlas of 35 plates. G. Reimer Verl., Berlin.
- Haeckel, E. 1893. Plankton studies: a comparative investigation of the importance and constitution of the pelagic fauna and flora (translated by G.W. Field). Report of the U.S. Commissioner of Fish and Fisheries, for 1889 to 1891, pages 565-641.

- Haeckel, E. 1899–1904. *Kunstformen der Natur*. Leipzig und Wien: Verlag des Bibliographischen Instituts. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/182319#page/7/mode/1up>
- IJken, Jan van 2022. *Planktonium : Courts métrages et séries de photos sur le monde caché du plancton microscopique vivant*. Arts et sciences. 1. 6 DOI : 10.21494/ISTE.OP.2022.0776
- Leewenhoeck, A. (1673), Regnerus de Graaf: A Specimen of Some Observations Made by a Microscope, Contrived by M. Leewenhoeck in Holland, Lately Communicated by Dr. Regnerus de Graaf. In: *Phil. Trans. Volume 8, 1673*, p. 6037-6038; doi: 10.1098 / rstl.1673.0017
- Leewenhoeck, A. van (1677): Observations, Communicated to the Publisher by Mr. Antony van Leewenhoeck, in a Dutch Letter of the 9th of Octob. 1676. Here English'd: concerning Little Animals by Him Observed in Rain-Well-Sea. and Snow Water; as Also in Water Wherein Pepper Had Lain Infused. In: *Phil. Trans. Volume 12, 1677*, p. 821-831; doi: 10.1098 / rstl.1677.0003
- Medlin, L. K. 2023. In memory of our friend and colleague Klaus Kemp. The International Society For Diatom Research. <https://isdr.org/in-memory-of-our-friend-and-colleague-klaus-kemp/>
- NASA. (2014). "Blue Marble: Next Generation." NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/map>
- Ruska, E., and Knoll, M. (1931) : Die magnetische Sammelspule für schnelle Elektronen-strahlen. (The magnetic concentrating coil for fast electron beams.) *Z. techn. Physik* 12,389-400 and 448 (1931).
- Sorby, H. C. F. 1877 On the characteristic colouring-matteers of the Red groups of Algae. *Journal of the Linnean Society of London*, 15, 34-40.
- Watson, J. D. et Crick F. H. C. 1953, « Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid », *Nature*, vol. 171, no 4356, 25 avril 1953, p. 737-738 (PMID 13054692, DOI 10.1038/171737a0, Bibcode 1953Natur.171..737W, lire en ligne [archive])