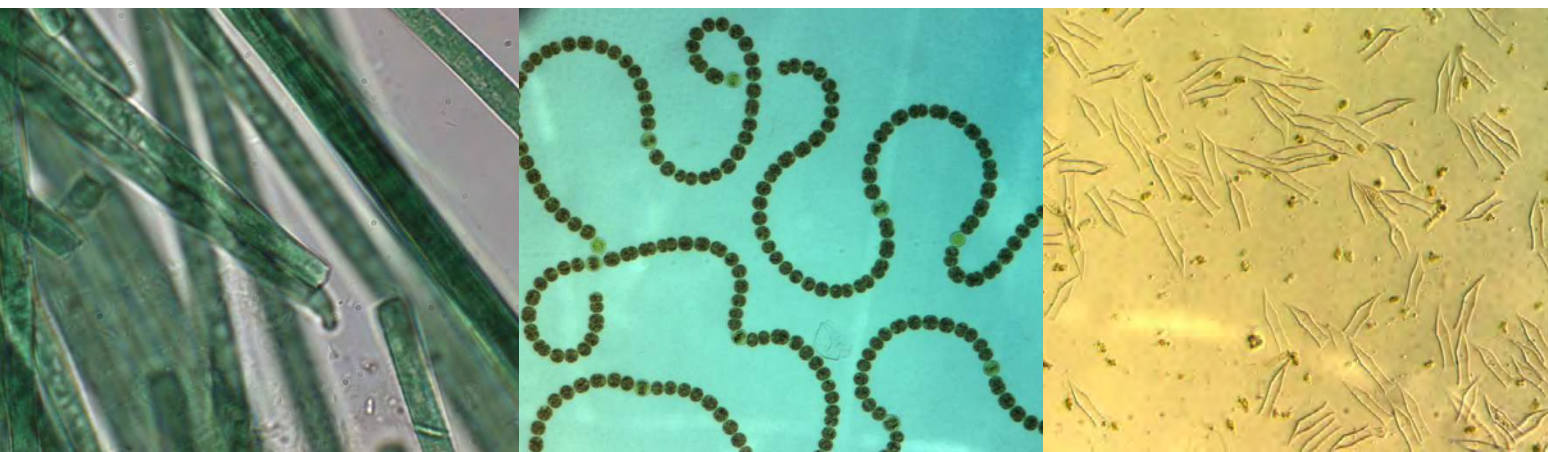


PROLIFERATION DU PHYTOPLANKTON EN EAUX DOUCES ET MARINES : ELEMENTS DE COMPREHENSION

PROJET de FICHES SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

Premiers exemples de fiches réalisées



Crédit photo : D. Rolland

Rédaction : D. Rolland, J. Launay, P. Aurousseau
en collaboration avec M. Bormans, L. Brient et A. Menesguen

Janvier 2015

**CONSEIL SCIENTIFIQUE
DE L'ENVIRONNEMENT
DE BRETAGNE**

AVANT PROPOS

Le conseil scientifique de l'environnement de Bretagne (CSEB) est un comité d'une vingtaine d'experts scientifiques, mis en place et renouvelé depuis 1993 par le Conseil régional de Bretagne qui le saisit sur des questions ou des dossiers relatifs à l'environnement et d'intérêt régional manifeste.

Ces dernières années, les scientifiques dont le CSEB ont été sollicités sur **les marées vertes à ulves** pour donner leur avis et apporter un éclairage sur les connaissances scientifiques permettant d'en expliquer les causes et les conséquences environnementales et sanitaires. **Mais, d'autres manifestations de l'eutrophisation se présentent sous forme de proliférations phytoplanctoniques dans les eaux douces et marines.** L'ouest de la France y est particulièrement exposé depuis des années. La problématique des blooms à cyanobactéries est prégnante dans bon nombre de plans d'eau, perturbant la production d'eau potable et les activités récréatives. Des phénomènes d'hypoxie des eaux et même d'anoxie sont constatés, notamment en Baie de Vilaine et aussi au sud de l'estuaire de la Loire, pouvant conduire à des mortalités de poissons et crustacés. Chaque année, des phénomènes d'eaux colorées sont observés sur le littoral atlantique et sud Bretagne. De multiples développements de microalgues toxiques se produisent dans les eaux côtières, occasionnant des interdictions de pêche ou commercialisation de coquillages.

En conséquence, le CSEB a décidé, en 2014, de se saisir de cette question afin d'attirer l'attention et d'informer la communauté bretonne (décideurs publics, acteurs professionnels et citoyens) sur ces perturbations des écosystèmes aquatiques et leurs conséquences environnementales et sanitaires.

Le séminaire organisé par le CSEB et le Centre de ressources et d'expertise scientifique sur l'eau de Bretagne (Creseb) à l'occasion du Carrefour de l'eau (CGLE, 28-29 janvier 2015) a constitué une première étape de **transfert de connaissances scientifiques** sur ce sujet et d'**échange** avec les acteurs en charge de la qualité de l'eau et de la gestion des écosystèmes aquatiques.

Parallèlement, nous proposons d'apporter **un regard transversal et pédagogique en rédigeant un ensemble de fiches techniques et scientifiques** dont une liste est proposée : l'objectif sera d'apporter (1) d'une part, des éléments de compréhension sur les mécanismes de proliférations phytoplanctoniques, leurs causes, leurs impacts sanitaires et environnementaux en montrant les spécificités ou les convergences entre les eaux douces et marines ; (2) d'autre part, des informations sur les méthodes et outils de surveillance, les mesures de lutte et de gestion des risques liés aux proliférations de phytoplancton.

Quelques exemples de fiches ont été réalisés pour apporter une première "mise de fond" et illustrer le type de documents (forme et fond) ¹ que nous estimons intéressant de développer à destination d'un public dit « intermédiaire », c'est-à-dire non expert mais avisé tels que les administrations, élus, techniciens ou animateurs de structure de bassins versants, de syndicats de gestion des eaux, de territoire de SAGE, etc. Elles sont téléchargeables sur le site du CSEB : www.cseb-bretagne.fr

Enfin, nous avons jugé utile de rédiger **un glossaire des termes scientifiques** fréquemment utilisés afin de (1) s'assurer d'un langage commun au sein de la communauté scientifique, (2) expliquer la complexité du monde phytoplanctonique et (3) bien comprendre les mécanismes d'apparitions des efflorescences en eaux douces et en eaux côtières.

Cette proposition de fiches n'est pas figée et évoluera selon les contributions scientifiques et les besoins et attentes du public visé. Un travail collaboratif avec le Creseb sera engagé en ce sens afin que le projet puisse se poursuivre en 2015.

¹ Le format s'inspire des fiches réalisées par le CSEB (2005, 2008) et fortement consultées, sur « le fonctionnement des bassins versants et le suivi de la qualité de l'eau » (<http://www.cseb-bretagne.fr/index.php/Table/Recueil-de-fiches/>) et de celles réalisées par le CRESEB sur la réduction des fuites d'azote en lien avec les pratiques et systèmes agricoles et les structures de paysage (<http://www.creseb.fr/>)

PROJET de FICHES

En gras noir = fiches réalisées et téléchargeables sur le site du CSEB

www.cseb-bretagne.fr

PARTIE I – PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES LIES A L'EUTROPHISATION DES EAUX

FAMILLE A – PROCESSUS EN LIEN AVEC L'OXYGENE DISSOUS

A1 – Dynamique spatiale et temporelle de l'oxygène dissous

A2 – Hypoxie et anoxie des eaux

FAMILLE B – PROCESSUS EN LIEN AVEC LES ELEMENTS NUTRITIFS

B1 – Dynamique spatiale et temporelle des nutriments majeurs (Carbone, Azote, Phosphore, Silice)

B2 – Phénomène de dystrophie : causes et conséquences

PARTIE II – CARACTERISATION DES GROUPES PHYTOPLANCTONIQUES PROLIFERANTS

FAMILLE C – LES CYANOBACTERIES

C1 – Description générale des cyanobactéries

C2 – Prolifération des cyanobactéries : définitions et causes

C3 – Impacts des proliférations de cyanobactéries

C4 – Caractéristiques des cyanotoxines

C5 – Eléments de réglementation concernant les cyanobactéries et cyanotoxines

C6 – Cartes d'identité de quelques espèces communes de cyanobactéries responsables d'efflorescences

FAMILLE D – LES DIATOMEES ET DINOFLAGELLES

D1 – Description générale des diatomées

D2 – Description générale des dinoflagellés

D3 – Prolifération des diatomées et dinoflagellés: définitions et causes

D4 – Impacts des proliférations de diatomées et dinoflagellés

D5 – Eléments de réglementation concernant les diatomées et dinoflagellés

D6 – Cartes d'identité de quelques espèces communes de diatomées responsables d'efflorescences

D7 – Cartes d'identité de quelques espèces communes de dinoflagellés responsables d'efflorescences

FAMILLE E – CAS CONCERNANT D'AUTRES GROUPES PHYTOPLANCTONIQUES MOINS FREQUENTS

PARTIE III – SURVEILLANCE ET REGLEMENTATION

FAMILLE F – INDICATEURS DE LA QUALITE DE L'EAU

F1 – Indicateurs biologiques

F2 – Indicateurs physico-chimiques

FAMILLE G – METHODES DE SUIVI DE LA QUALITE DE L'EAU

G1 – Méthodes de mesure des données biologiques

G2 – Méthodes de mesure des données physico-chimiques

G3 – Arbres décisionnels

FAMILLE H – CLES DE RECONNAISSANCE VISUELLE DES EFFLORESCENCES DE PHYTOPLANCTON

PARTIE IV – GESTION DES EFFLORESCENCES DE PHYTOPLANCTON

FAMILLE I – MESURES DE REDUCTION DE L'EUTROPHISATION

FAMILLE J – MESURES INTRUSIVES DE RESTAURATION

FAMILLE K – GESTION DES RISQUES SANITAIRES

GLOSSAIRE

Tous les mots marqués par le symbole  dans les fiches sont définis dans le glossaire.

A1. DYNAMIQUE SPATIALE ET TEMPORELLE DE L'OXYGENE DISSOUS

CE QU'IL FAUT RETENIR

- L'oxygène dissous est primordial pour la **survie des organismes aquatiques**.
- La solubilité de l'oxygène dissous est dépendante de la **température, la salinité, la pression et la profondeur**.
- L'oxygène est produit biologiquement par la **photosynthèse** et consommé par la **respiration**.
- Il existe de fortes **variations temporelles** (journalières et saisonnières) et **spatiales** (verticales et horizontales) de la teneur en oxygène dissous dans l'eau.

1. DEFINITION

L'oxygène dissous est l'oxygène (O_2) présent **en solution dans l'eau**. On utilise généralement l'abréviation OD. La quantité d'oxygène dissous peut être exprimée dans différentes unités de concentration : mg/L, mol/L, ou pourcentage (%) par rapport à la saturation. Dans ce dernier cas, on parle aussi de « **taux de saturation** ♦ » qui est le rapport entre la concentration mesurée en oxygène dissous et la concentration théorique maximale d'oxygène en solution appelée aussi « **teneur à saturation** ♦ ».

2. IMPORTANCE BIOLOGIQUE

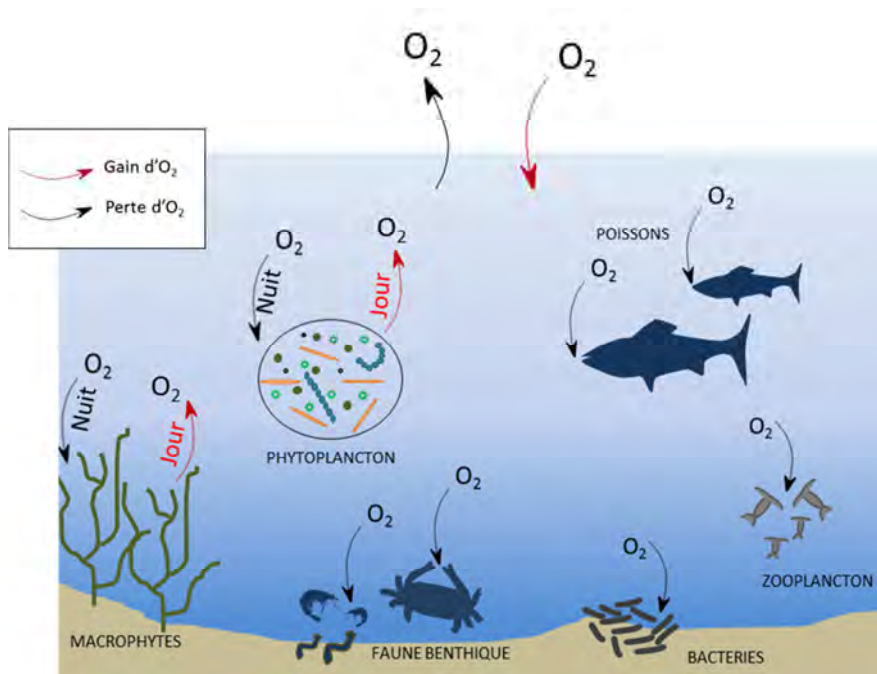


Figure 1. Bilan d'oxygène dissous dans les écosystèmes aquatiques. La quantité d'oxygène dissous présent dans un écosystème aquatique dépend des apports (advection des masses d'eau, diffusion et production par photosynthèse) et des pertes (diffusion et respiration des organismes).

En milieu aquatique, comme en milieu terrestre, l'oxygène est **indispensable à la plupart des formes de vie** incluant les poissons, les invertébrés, les plantes et les bactéries (**Fig. 1**). Cependant, en milieu aquatique, l'oxygène est présent sous forme d'oxygène dissous dans l'eau et c'est sous cette forme qu'il est assimilé par les organismes aquatiques. Par abus de langage on parle de « **respiration** » des organismes aquatiques, bien que l'oxygène ne soit pas assimilé directement sous forme gazeuse mais en solution dans l'eau.

Les organismes aquatiques ont besoin d'une quantité minimale d'oxygène dissous pour survivre. Il existe donc un **seuil minimum** nécessaire qui varie en fonction des organismes. Par exemple, les crabes, huîtres et vers marins ont des besoins minimaux (1-4 mg/L), tandis que certains poissons d'eaux peu profondes ont besoin de concentrations plus élevées (> 4 mg/L).

3. TENEUR EN OXYGENE : RESULTAT D'UN BILAN COMPLEXE

3.1. Les échanges avec l'atmosphère (absorption - évaporation)

À l'interface air/eau, l'oxygène peut diffuser de l'air vers l'eau (**Fig. 1**). La teneur en O_2 dissous dans l'eau va alors croître. Ceci est possible tant que la teneur en O_2 dissous est inférieure à la teneur à saturation.

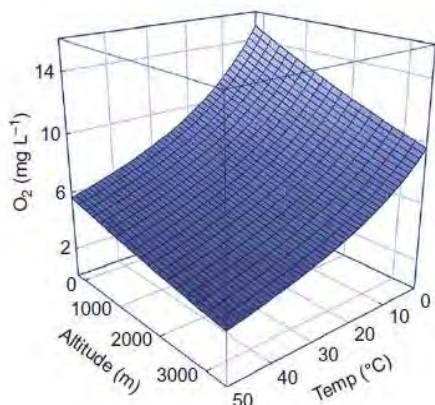
Inversement, l'oxygène peut diffuser de l'eau vers l'air (**Fig. 1**) en situation de **sursaturation** de l'eau en oxygène ; c'est-à-dire lorsque la teneur en O_2 dissous est supérieure à la teneur à saturation.

Ces phénomènes de diffusion de l'oxygène entre une masse d'eau et l'atmosphère sont relativement lents. Cependant, les vagues et remous créés par le vent facilitent les échanges en augmentant la surface de contact avec l'atmosphère et accélèrent le processus.

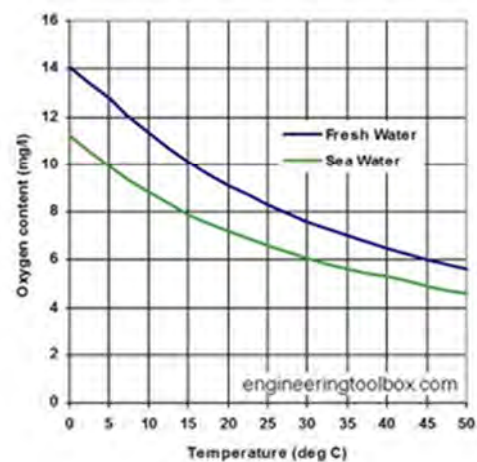
3.2. La teneur à saturation en oxygène

Une eau est **saturée en oxygène** lorsqu'elle a atteint une concentration en O_2 à l'équilibre et ne peut plus dissoudre ce gaz. La teneur à saturation en oxygène, c'est-à-dire la quantité maximale d' O_2 qui peut être dissoute dans l'eau, est fonction de :

- la **température** : plus elle est élevée, moins la teneur en O_2 à saturation est importante (**Fig. 2a et 2b**).
- la **pression atmosphérique** : plus elle est élevée, plus la teneur en O_2 à saturation est importante. La pression atmosphérique est essentiellement dépendante de l'**altitude** (**Fig. 2a**).
- la **salinité** : plus elle est élevée, moins la teneur en O_2 à saturation est importante (**Fig. 2b**).
- La pression **hydrostatique (= la profondeur)** : plus elle est élevée, plus la teneur en O_2 à saturation est importante.



(a)



(b)

Figure 2. Concentrations à saturation de l'oxygène dissous en fonction de (a) la température et l'altitude et (b) de la température et la salinité (d'après Dodds et Whiles, 2010).

Exemples :

Une eau de surface d'un lac (salinité = 0 ppm) au niveau de la mer (altitude = 0 m) à 11°C, aura une teneur maximale à saturation en O₂ dissous de 11.0 mg/L (voir **Tableau 1**).

Il faudra utiliser un facteur de correction si ce lac est en altitude (voir **Tableau 2**) : s'il est par exemple à 500 m d'altitude on aura une teneur maximale à saturation de $11.0 \times 0.94 = 10.3$ mg/L.

Une eau de surface en pleine mer (salinité = 35 ppm) à 11°C aura une teneur maximale à saturation de 8.8 mg/L (voir **Tableau 1**).

Tableau 1. Solubilité de l'oxygène en fonction de la température et de la salinité (pour une pression atmosphérique de 1013 hPa).

	Salinité (ppm)								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	14,60	14,11	13,64	13,18	12,74	12,31	11,90	11,50	11,11
1	14,20	13,72	13,27	12,82	12,40	11,98	11,58	11,20	10,82
2	13,81	13,36	12,91	12,49	12,07	11,67	11,29	10,91	10,55
3	13,44	13,00	12,58	12,16	11,76	11,38	11,00	10,64	10,29
4	13,09	12,67	12,25	11,85	11,47	11,09	10,73	10,38	10,04
5	12,76	12,34	11,94	11,56	11,18	10,82	10,47	10,13	9,80
6	12,44	12,04	11,65	11,27	10,91	10,56	10,22	9,89	9,57
7	12,13	11,74	11,36	11,00	10,65	10,31	9,98	9,66	9,35
8	11,83	11,46	11,09	10,74	10,40	10,07	9,75	9,44	9,14
9	11,55	11,18	10,83	10,49	10,16	9,84	9,53	9,23	8,94
10	11,28	10,92	10,58	10,25	9,93	9,62	9,32	9,03	8,75
11	11,02	10,67	10,34	10,02	9,71	9,41	9,12	8,83	8,56
12	10,77	10,43	10,11	9,80	9,50	9,21	8,92	8,65	8,38
13	10,52	10,20	9,89	9,59	9,29	9,01	8,73	8,47	8,21
14	10,29	9,98	9,68	9,38	9,10	8,82	8,55	8,29	8,04
15	10,07	9,77	9,47	9,19	8,91	8,64	8,38	8,13	7,88
16	9,86	9,56	9,28	9,00	8,73	8,47	8,21	7,97	7,73
17	9,65	9,36	9,09	8,82	8,55	8,30	8,05	7,81	7,58
18	9,45	9,17	8,90	8,64	8,38	8,14	7,90	7,66	7,44
19	9,26	8,99	8,73	8,47	8,22	7,98	7,75	7,52	7,30
20	9,08	8,81	8,56	8,31	8,06	7,83	7,60	7,38	7,17
21	8,90	8,64	8,39	8,15	7,91	7,68	7,46	7,25	7,04
22	8,73	8,48	8,23	8,00	7,77	7,54	7,33	7,12	6,91
23	8,56	8,32	8,08	7,85	7,63	7,41	7,20	6,99	6,79
24	8,40	8,16	7,93	7,71	7,49	7,28	7,07	6,87	6,68
25	8,24	8,01	7,79	7,57	7,36	7,15	6,95	6,75	6,56
26	8,09	7,87	7,65	7,44	7,23	7,03	6,83	6,64	6,46
27	7,95	7,73	7,51	7,31	7,10	6,91	6,72	6,53	6,35
28	7,81	7,59	7,38	7,18	6,98	6,79	6,61	6,42	6,25
29	7,67	7,46	7,26	7,06	6,87	6,68	6,50	6,32	6,15
30	7,54	7,33	7,14	6,94	6,75	6,57	6,39	6,22	6,05

Tableau 2. Facteurs de correction à appliquer en fonction de l'altitude de la masse d'eau (multiplication de la solubilité au niveau de la mer par le facteur de correction).

Altitude (m)	Facteur de correction	Altitude (m)	Facteur de correction	Altitude (m)	Facteur de correction
0	1.00	400	0.95	750	0.91
50	0.99	450	0.95	800	0.91
100	0.99	500	0.94	850	0.90
150	0.98	550	0.94	900	0.90
200	0.98	600	0.93	950	0.89
300	0.96	650	0.93	1000	0.89
350	0.96	700	0.92	1050	0.88

4. CONSOMMATION ET PRODUCTION BIOLOGIQUE D'O₂ DISSOUS



4.1. Variations journalières

Plus de 90% des organismes aquatiques utilisent l'oxygène pour leur **respiration**, c'est donc la principale cause biologique de sa diminution dans la colonne d'eau (Fig.1).



Equation Respiration

Durant le jour, les plantes, les microalgues et les cyanobactéries utilisent la lumière et le gaz carbonique (CO₂) afin de produire leur biomasse. Ce processus, appelé **photosynthèse**, libère de l'oxygène dans l'eau (Fig.1).



Equation Photosynthèse

Ces processus biologiques vont entraîner des variations temporelles de la concentration en O₂ dissous à l'échelle de la journée. Ainsi, durant la nuit, la photosynthèse s'interrompt par manque d'énergie lumineuse et la production d'oxygène s'arrête, mais les organismes continuent de respirer. La concentration en O₂ dissous va par conséquent chuter la nuit, parfois de façon importante s'il y a une forte présence d'**organismes photosynthétiques**, mais aussi de bactéries décomposant la matière organique accumulée. Le taux de photosynthèse peut aussi fortement chuter pendant le jour si le temps est très couvert ou la turbidité de l'eau importante.

4.2. Sursaturation

La concentration en O₂ dans l'eau de surface peut parfois excéder les 100% de taux de saturation. On appelle ce type de situation « **sursaturation** ». La sursaturation n'est pas une situation d'équilibre mais ce phénomène est fréquent surtout en été et traduit une forte production d'oxygène par les organismes photosynthétiques. La concentration en O₂ dissous va ensuite s'équilibrer doucement avec l'atmosphère. Par exemple, si un taux de saturation de 120 % est produit par une activité photosynthétique intense, la quantité d'oxygène en surplus va se diffuser dans l'air.

5. LA DISTRIBUTION VERTICALE D'OXYGENE

La distribution verticale de l'O₂ dissous est fonction des transferts diffusifs entre l'air et l'eau, de la consommation ou de la production biologique mais aussi des phénomènes hydrodynamiques (stratification, mélanges, courants). A l'échelle de la colonne d'eau, les concentrations en O₂ dissous ne sont donc pas constantes et peuvent varier théoriquement de 0 mg/L (anoxie) à 20 mg/L (eau de surface supersaturée du fait de proliférations algales). Par comparaison, l'oxygène est présent dans l'atmosphère à raison de 210 000 mg/l.

Le profil d'oxygène dissous dans un lac évolue en fonction des **saisons**. La concentration est relativement **homogène** dans toute la colonne d'eau pendant les **périodes de mélange** (typiquement de l'automne au printemps) et **hétérogène** pendant les **périodes de stratification** (été, mais aussi pendant l'hiver pour les lacs qui gèlent en surface).

La distribution de l'oxygène dissous va aussi dépendre de l'hétérogénéité horizontale, c'est-à-dire des apports par advection (panaches de dilution des fleuves, influence de la côte...).

Différents cas fréquemment observés sont présentés dans la **figure 3** :

- **Situation 1** : la colonne d'eau est mélangée jusqu'au fond et donc la température et la teneur en oxygène dissous sont verticalement homogènes.
- **Situation 2** : profil typique d'un lac eutrophe stratifié. La couche supérieure du lac est mélangée et caractérisée par une concentration en O₂ relativement élevée et homogène. Cette concentration traduit une importante production d'oxygène par le phytoplancton qui se développe. La couche

inférieure du lac est caractérisée par une importante accumulation de matière organique. Cette matière organique est décomposée par les bactéries qui consomment l'oxygène dissous. A cette profondeur, le manque de lumière ne permet pas de production d'oxygène par la photosynthèse. Il en résulte une chute drastique de la concentration en oxygène dissous jusqu'à l'**hypoxie** ●, voire l'**anoxie**¹ ●. L'écart de concentration entre la couche supérieure et la couche inférieure engendre un gradient de concentration très marqué dans la couche intermédiaire. Ce genre de profil est aussi observable en milieu marin, surtout en été, dans les endroits confinés, stratifiés et très enrichis par les apports fluviaux de nutriments ● (Golfe du Mexique, Mer Baltique, Baie de Vilaine...).

- **Situation 3** : le décrochement du profil peut traduire deux situations différentes ; soit la présence d'une population phytoplanctonique localisée (du fait d'une bonne disponibilité de la lumière et des nutriments à cette profondeur) et donc produisant de l'O₂ dissous ; soit l'arrivée d'une masse d'eau plus riche en oxygène dissous.

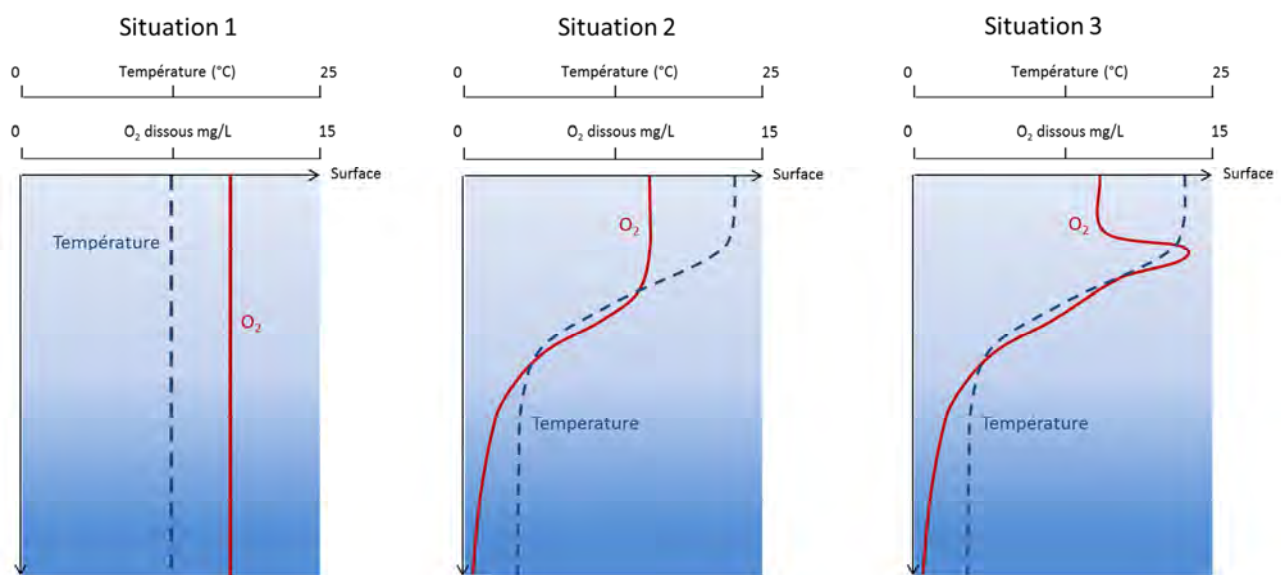


Figure 3. Exemple de profils de distribution verticale de l'oxygène dissous fréquemment observés.

REFERENCES

- Diaz R.J. (2001) *Overview of Hypoxia around the world*. Journal of environmental quality, 30: 275-281.
- Dodds W.K., et Whiles M.R. (2010). Chapter 12: *Aquatic chemistry and factors controlling nutrient cycling: Redox and O₂*. Freshwater ecology: Concepts and environmental applications of limnology (2nd ed.). San Diego, CA: Academic Press.
- Rabalais N.N., Diaz R.J., Levin L.A., Turner R.E., Gilbert D., et Zhang, J. (2010). *Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia*. Biogeosciences, 7 : 585-619.
- Wetzel R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3rd ed.). San Diego, CA: Academic Press.

1. Lorsque l'O₂ dissous est consommé à un rythme plus élevé que la production par la photosynthèse, on peut atteindre des conditions d'**hypoxie** (peu d'O₂) ou même d'**anoxie** (O₂ complètement absent). La problématique d'hypoxie/anoxie est plus amplement détaillée dans la **fiche A2**.

A2. HYPOXIE ET ANOXIE DES EAUX

CE QU'IL FAUT RETENIR

- L'hypoxie est un **appauvrissement de la teneur en oxygène** en solution dans l'eau. Le seuil de l'hypoxie est en général fixé à 2 mg O₂ / L.
- On parle en général d'anoxie lorsque la teneur en oxygène dissous est **non détectable** (0.00 mg O₂ / L).
- L'hypoxie/anoxie se développe lorsque les **pertes** en oxygène excèdent les **apports**.
- L'hypoxie/l'anoxie perturbent la physiologie des organismes aquatiques et leurs **seuils de tolérance** différent selon les organismes et les espèces.
- L'anoxie à l'interface eau/sédiment induit des réactions biogéochimiques et favorise, entre autres, le **relargage de phosphore soluble** (facteur limitant pour les microalgues).

1. DEFINITIONS

L'**hypoxie** ♦ caractérise une situation d'appauvrissement de la teneur en oxygène en solution dans l'eau. Si la teneur en oxygène dissous continue de baisser, l'hypoxie peut-être suivie par une phase « **d'anoxie** ♦ ». Ce deuxième terme n'est cependant pas tout à fait utilisé de la même façon que l'on soit en milieu marin ou en eau douce.

Les phénomènes d'hypoxie et d'anoxie induisent un **impact physiologique négatif sur les organismes aquatiques**.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour définir l'hypoxie et l'anoxie : soit la mesure de **la teneur** (ou concentration) en oxygène dissous (mg/L), soit le **taux de saturation** en oxygène (%). Les problèmes physiologiques induits par le manque d'oxygène sont directement liés à des concentrations absolues en oxygène dissous et non à des taux de saturation.

1.1. Hypoxie

La détermination d'une situation d'hypoxie s'effectue à partir de **seuils** de concentration en oxygène. Puisque les organismes aquatiques n'ont pas tous la même sensibilité aux faibles concentrations en oxygène dissous, trois seuils de concentration absolue sont donc généralement considérés :

- **seuil sensible** (< 6 mg/L) : stress et développement perturbé d'un certain nombre d'organismes aquatiques sensibles (comme les alevins).
- **seuil critique** (< 2 mg/L) : faune et flore en difficulté et menace de la vie aquatique.
- **seuil léthal** (< 1 mg/L) : asphyxie et mortalité.

1.2. Anoxie

Littéralement, l'anoxie est une absence totale d'oxygène. Au contraire, un milieu « **oxique** » contient de l'oxygène. De ce fait, en **limnologie** ♦, on parle d'anoxie lorsque la concentration en oxygène dissous n'est pas détectable dans le milieu (0 mg/L). Cependant, en **océanographie**, on parle « **d'anoxie des eaux** » dans les cas où la teneur en oxygène est trop faible pour permettre la vie aquatique. Ce terme fait donc référence à une **hypoxie** sévère et correspond généralement à un seuil de 2 mg/L.

« L'**anoxie des fonds** » caractérise une situation où on observe une hypoxie sévère ($< 2 \text{ mg/L}$) à l'interface entre l'eau et le sédiment.

2. CAUSES DE L'HYPOXIE ET DE L'ANOXIE

2.1. Principe général (Fig.1)

L'hypoxie se produit lorsque la **diminution** d'oxygène (par le biais de la respiration des êtres vivants) excède **les apports** d'oxygène (par le biais de la photosynthèse, la diffusion et les mélanges).

Les caractéristiques physiques et biologiques de la colonne d'eau qui favorisent le développement et le maintien de l'hypoxie incluent :

- la stabilité de la colonne d'eau (provoquant une **stratification verticale** qui limite le contact direct avec l'atmosphère) et
- la production et l'accumulation de matière organique provenant de la couche supérieure de la colonne d'eau.

Le phytoplancton et les autres organismes morts contribuent à l'accumulation de débris organiques dans les couches profondes. Par la suite, les bactéries **aérobies** ● consomment l'oxygène pour décomposer cette matière organique, parfois jusqu'à l'anoxie.

L'hypoxie va persister aussi longtemps que le taux de consommation de l'oxygène excède celui de la production.

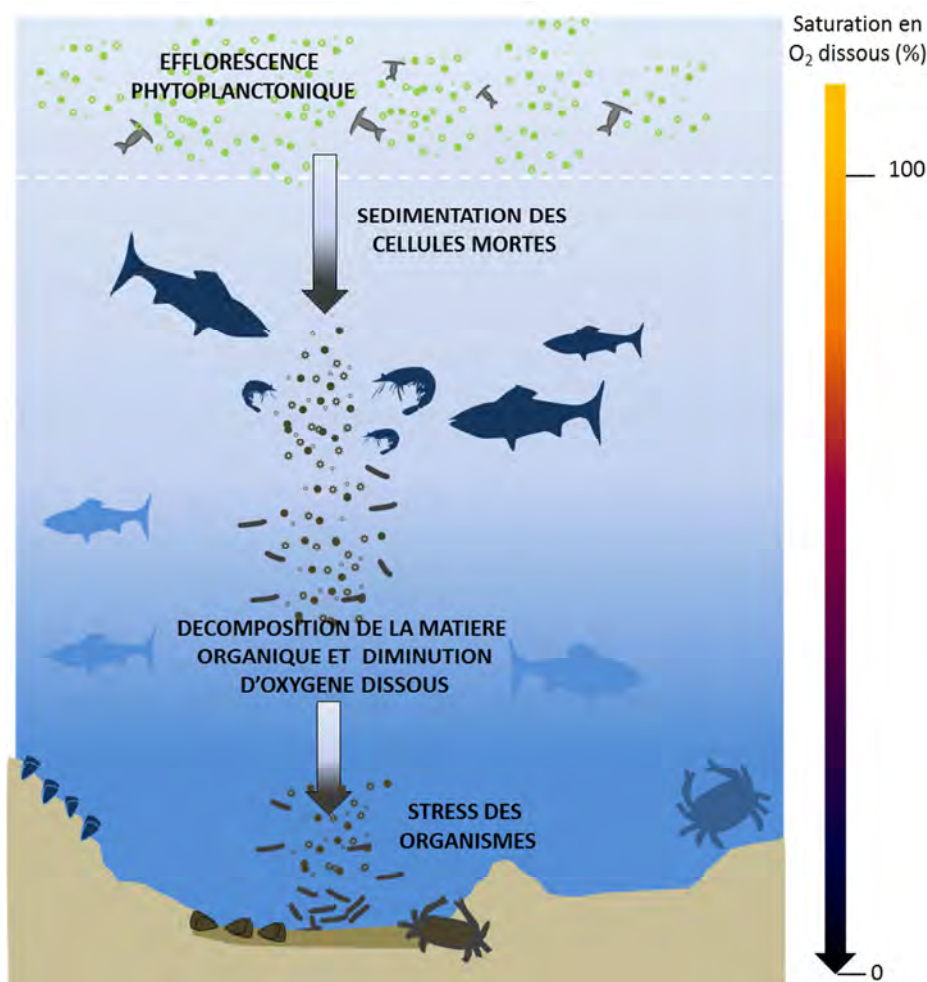


Figure 1. Principe général de l'hypoxie. Les cellules mortes sédimentent et s'accumulent au fond de l'eau, ce qui engendre une consommation accrue de l'oxygène par les bactéries décomposant la matière organique accumulée, et a pour conséquence un stress des organismes aquatiques.

2.2. Eutrophisation et hypoxie/anoxie

L'hypoxie/anoxie est un phénomène de plus en plus récurrent dans les zones du globe fortement anthropisées¹ et est devenu un 'symptôme' majeur de l'**eutrophisation** des eaux.

- En milieu marin, l'épuisement de l'oxygène a lieu le plus souvent dans les estuaires ou les eaux côtières présentant des apports importants en nutriments et en matières organiques, associé à de longs temps de résidence et une colonne d'eau stratifiée.

En France, le principal site côtier sujet à de telles anoxies est la baie de Vilaine, sur le littoral atlantique, où une mortalité massive de poissons et d'invertébrés benthiques a eu lieu fin juillet 1982 (Merceron 1987). Dans le monde, les deux sites les plus étendus et les plus régulièrement atteints sont la Mer Baltique et le Golfe du Mexique. En Mer Baltique, les apports importants de nutriments ont provoqué une augmentation de la production primaire, et par conséquent l'extension des zones anoxiques s'étendant sur 49 000 km² en moyenne depuis 1960 (Conley et al., 2009). Le Golfe du Mexique reçoit 3 fois plus d'apports de nutriments depuis la seconde guerre mondiale ; ces apports induisent tous les ans une forte production primaire et des désoxygénations s'étendant sur des surfaces allant de 5 000 à 20 000 km² (Rabalais et al., 2002).

- Dans les lacs stratifiés très 'productifs' (eutrophes ou hypereutrophes), l'accumulation de matière organique provenant du phytoplancton et des **macrophytes** est importante et des périodes d'hypoxie/anoxie peuvent persister. Dans le cas d'**efflorescences** de phytoplancton, et plus particulièrement de cyanobactéries, de fortes concentrations de cellules peuvent s'accumuler en surface, limitant ainsi la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau. Des conditions anoxiques peuvent ensuite en résulter.
- Dans les écosystèmes aquatiques moins profonds (étangs, rivières à faible débit, mares), il n'y a pas de véritable stratification : la lumière et l'énergie solaire atteignent le fond de la colonne d'eau sur toute sa surface. La **photosynthèse** peut donc s'effectuer jusqu'au fond ce qui favorise la colonisation par le phytobenthos. Dans les zones particulièrement denses de macrophytes, la lumière ne peut pas pénétrer jusqu'au fond, ce qui accélère le processus d'hypoxie/anoxie (surtout la nuit).

3. CONSÉQUENCES DE L'HYPOXIE ET DE L'ANOXIE SUR LA FAUNE AQUATIQUE

3.1. Effets létaux et sublétaux

L'hypoxie induit un impact physiologique négatif sur certains organismes aquatiques et les conduit à adopter des **stratégies d'évitement** (remontée en surface pour respirer, fuite vers des eaux plus riches en oxygène). Les animaux fixés ne peuvent pas développer de stratégies d'évitement et sont donc en conséquence les victimes les plus fréquentes de l'hypoxie. Ce n'est que dans les cas d'hypoxie très sévère et très brutale, voire d'anoxie que l'on observe la **mortalité** des organismes aquatiques très mobiles comme les poissons (**Fig. 2**).

Figure 2. Mortalité de poissons aux étangs d'Apigné (Ile-et-Vilaine).



© Luc Brient

Plus communément, l'hypoxie va créer des effets **sublétaux** sur les organismes, c'est-à-dire des effets qui vont **diminuer la capacité des populations à se maintenir à l'équilibre**. Cela peut se traduire de différentes façons : réduction de la fécondité, réduction de la survie des œufs, larves et juvéniles, ralentissement de la croissance, altération des comportements migratoires, etc.

1. L'hypoxie est une caractéristique naturelle de certains milieux aquatiques (zones océaniques de minimum d'oxygène, marais, tourbières, lacs gelés en hiver, etc...).



Ces effets qui interviennent au niveau de la performance des individus, vont avoir des conséquences sur la population dans son ensemble (diminution de la diversité) et vont se **répercuter sur toute la chaîne trophique** (interactions prédateurs-proies).

3.2. Seuils de sensibilité

La sensibilité des organismes à la diminution d'oxygène dissous varie selon les espèces considérées et leurs tolérances.

Par exemple, les poissons de qualité tels que les **salmonidés** (truites et saumons) finissent par céder la place aux **cyprinidés** (tanches et gardons) lorsque la teneur en oxygène diminue fortement (**Tableau 1**). De manière générale, les **poissons d'eaux chaudes** sont plus tolérants aux faibles teneurs en oxygène dissous que les **poissons d'eaux froides**.

Tableau 1. Classification des exigences en matière d'oxygène dissous chez les espèces de poissons d'eau douce.

Classes d'exigence	Espèces de poissons d'eau douce
Espèces très exigeantes (> 7 mg/L)	Truite, vairon, chabot, saumon
Espèces moyennement exigeantes (5-7 mg/L)	Goujon, chevaine
Espèces peu exigeantes (2-4 mg/L)	Gardon, brochet, sandre
Espèces très peu exigeantes (0.5-1 mg/L)	Carpe, tanche

En général, les **invertébrés benthiques** 'supportent' une hypoxie jusqu'à 2 mg/L, à condition que celle-ci ne soit pas d'une durée excédant quelques jours. Les vers polychètes sont cependant plus tolérants (jusqu'à 1 mg/L) que les crustacés, coquillages, échinodermes et gastéropodes.

3.3. Diminution des ressources piscicoles

Les effets négatifs de l'hypoxie sur la faune aquatique, et plus particulièrement sur les ressources piscicoles et conchylicoles, entraînent non seulement une **préoccupation écologique** mais aussi **économique et sociale**, notamment sur la question de la **durabilité de la pêche**.

➤ Exemple en eau douce

Le lac Erié (Etats-Unis et Canada) accueille une variété de poissons écologiquement et économiquement importants, mais depuis les années 1950, l'eutrophisation du lac a conduit à des événements d'hypoxies de plus en plus récurrents. Cette diminution d'oxygène a contribué à la perte totale d'espèces natives piscivores (ex. : l'Ombre du Canada, le Doré bleu) et à la forte diminution d'espèces planctivores (Eperlan), au profit d'espèces benthivores de moindre intérêt récréatif et commercial (Buffalo, Gobie). Les Etats-Unis et le Canada ont dépensé des milliards de dollars dans la mise en place de moyens de réduction des apports de phosphore provenant des activités humaines, dans le but de revenir à des conditions oxiques.

➤ Exemple en eau côtière

Les détroits du Danemark et la Mer Baltique ont subi une dégradation des conditions oxiques dans la deuxième moitié du 20^e siècle suite à une intensification des apports de nutriments. Les impacts écologiques ont été nombreux et se sont rapidement manifestés, principalement du fait du caractère confiné des zones et de la stratification des eaux. Les proliférations algales et les périodes prolongées d'hypoxie et d'anoxie ont conduit à la quasi-fermeture de la pêcherie de langoustines (Rosenberg et al. 1990)

4. CONSEQUENCES BIOGEOCHIMIQUES DE L'HYPOXIE ET DE L'ANOXIE

4.1. Relargage de phosphore à l'interface eau/sédiments

En conditions oxygènes, une grande partie du phosphore est sous forme particulaire, adsorbé aux argiles, à la matière organique, au fer, à l'aluminium ou aux carbonates et a donc tendance à s'accumuler au niveau des sédiments. Par exemple, les lacs suffisamment profonds, ayant une couche profonde bien oxygénée et présentant un long temps de résidence peuvent conserver 70 à 90% des apports externes de phosphore au niveau des sédiments. Dans ces conditions, le phosphore est un **facteur limitant** dans les écosystèmes aquatiques car non **biodisponible** (non assimilable par le phytoplancton).

Lorsque les conditions deviennent anoxiques à l'interface eau/sédiments, du phosphore inorganique soluble, donc directement consommable par le phytoplancton peut être libéré dans la colonne d'eau. Ce changement de conditions entraîne une **boucle de rétroaction positive** (Fig. 3) et un rebond de l'eutrophisation.

Cependant, ce phénomène complexe dépend de plusieurs facteurs tels que le **potentiel redox à l'interface eau/sédiments**, la **concentration en fer, aluminium et calcium**, le **pH**, la **température**, l'**activité bactérienne**, la **bioturbation** et le **potentiel de resuspension des sédiments**.

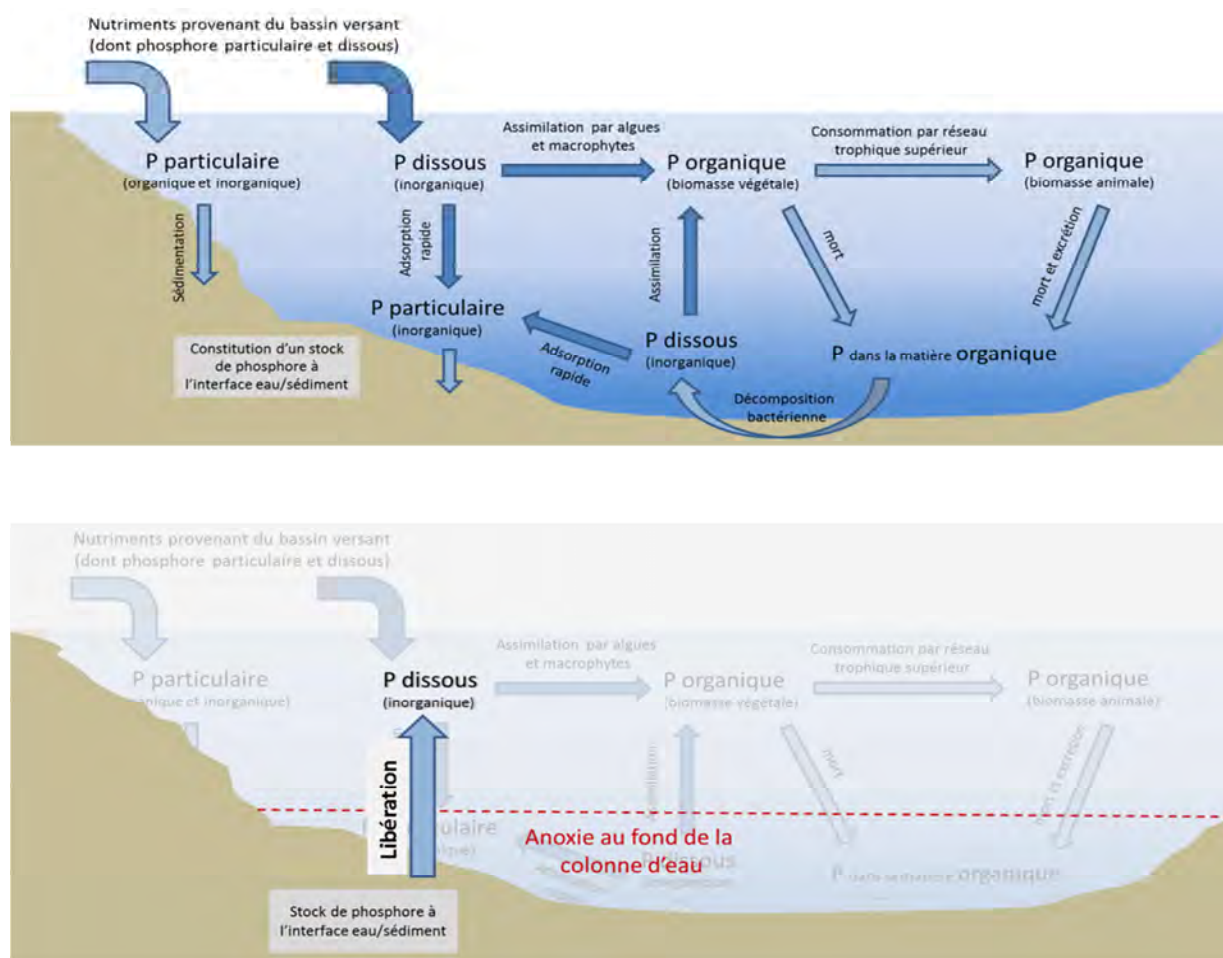


Figure 3. Cycle du phosphore en milieu aquatique. Haut : en situation « oxygène ». Bas : en situation « anoxique ».

4.2. Relargage d'éléments toxiques

C'est la modification des **conditions redox** à l'interface eau/sédiments, qui conduit à la dissolution des hydroxydes de fer et/ou de manganèse et à la libération du phosphore qui lui est associé.

En effet, lors de la **décomposition de la matière organique** par les bactéries, l'oxygène est activement consommé. Lorsqu'il est complètement épuisé, les bactéries utilisent l'oxygène contenu dans les nitrates (NO_3^-). En absence d'oxygène et de nitrates, le fer et le manganèse initialement présents sous forme

d'oxydes et d'hydroxydes ($\text{Fe}(\text{OH})_3$; MnO_2) sont à leur tour réduits et libérés sous forme d'ions solubles dans l'eau (Fe^{2+} ; Mn^{2+}). En conditions normales, ces ions n'existent qu'à l'état de traces dans l'eau, mais en conditions d'anoxie, les concentrations induites peuvent être très élevées (jusqu'à quelques mg/L pour le manganèse et quelques dizaines de mg/L pour le fer). Dans les stades les plus avancées de l'anoxie et des mécanismes de réduction, ce sont les sulfates (SO_4^{2-}) qui sont réduits en sulfures.

Tous ces éléments chimiques présentent des **risques de toxicité aiguë et chronique** pour l'homme, mais aussi pour la faune et la flore aquatique, et leur concentration en solution dans l'eau est réglementée.

REFERENCES

- Adam K., Bisson M., Duchêne I., Ghillebaert F., Guillard D., Tack K., Zdanévitch I.** (2011). *Sulfure d'hydrogène*. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS.
- Bisson M., Bureau J., Houeix N., Jolibois B., Gay G., Lefevre J.-P., Tack K.** (2012). *Le manganèse et ses dérivés*. Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques, INERIS.
- Boust D., Fischer J.-C., Ouddane B., Petit F., Wartel M.** (1999). *Fer et manganèse : réactivité et recyclage*. Programme Seine-Aval, Ifremer.
- Conley D.J., Björck S., Bonsdorff E., Carstensen J., Destouni G., Gustafsson B.G., Hietanen S., Kortekaas M., Kuosa H., Meier H.E.M., Müller-Karulis B., Nordberg K., Norkko A., Nürnberg G., Pitkänen H., Rabalais N.N., Rosenberg R., Savchuk O.P., Slomp C.P., Voss M., Wulff F., et Zillén L.** (2009). *Critical Review: Hypoxia-related processes in the Baltic Sea*. Environmental Science and Technology, 43: 3412-3420.
- Gaury N., Gruau G., Jardé E., Pierson-Wickmann A.-C., Brient L., Petitjean P., Hénin O., Lengronne M.** (2008). *Pollution de la retenue de Rophemel par les matières organiques et le phosphore*. Agence de l'eau Loire-Bretagne.
- Knight R., Ryan P.** (1999). *Lake Erie Lakewide Management Plan (LaMP)*. Technical report series No.4.
- Likens G.E.** (2009). *Encyclopedia of inland waters*. Oxford: Elsevier.
- Merceron M.** (1987). *Mortalités de poissons en baie de Vilaine (juillet 1982), Causes – Mécanismes – Propositions d'action*. Rapport Ifremer/DERO – 87, 14 – EL.
- Rabalais N. N., Díaz R. J., Levin L. A., Turner R. E., Gilbert D., Zhang J.** (2010). *Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia*. Biogeosciences, 7, 585-619.
- Rabalais N.N., Turner R.E., Scavia D.** (2002). *Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River*. BioScience, 52: 129-142.
- Rosenberg R., Elmgren R., Fleischer S., Jonsson P., Persson G. et Dahlin H.** (1990). *Marine eutrophication case studies in Swede..* Ambio, 19 : 102-108.

C1. DESCRIPTION GENERALE DES CYANOBACTERIES

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Les cyanobactéries sont des **organismes procaryotes appartenant au règne des bactéries**.
- Les cyanobactéries font naturellement partie de la biosphère depuis plus de **2 milliards d'années**.
- Les cyanobactéries sont des **bactéries photosynthétiques**, c'est-à-dire qu'elles tirent parti, comme les plantes, de l'énergie solaire pour synthétiser leurs molécules organiques.
- Les cyanobactéries qui colonisent **la colonne d'eau** des écosystèmes aquatiques continentaux et marins **font partie du phytoplancton**.
- Les cyanobactéries sont **très diversifiées et divisées en 4 ordres**.
- La présence de **structures ayant des fonctions spécialisées** leur confère des **avantages compétitifs** par rapport aux microalgues eucaryotes : taux de croissance élevé, protection contre les UV, fixation d'azote atmosphérique, flottabilité, stockage de nutriments, dormance.
- Les cyanobactéries peuvent **proliférer dans tous les écosystèmes**, qu'ils soient terrestres ou aquatiques, et former des symbioses.
- Certaines espèces de cyanobactéries sont **productrices de toxines**.

1. INTRODUCTION

Les cyanobactéries sont des **bactéries** particulières puisque capables de **photosynthèse**, c'est-à-dire d'utiliser le dioxyde de carbone (CO_2) comme source de carbone (**autotrophie** ●). Ce sont des organismes qui jouent un rôle important au sein des **chaines trophiques** ● et de la **production primaire** ●.

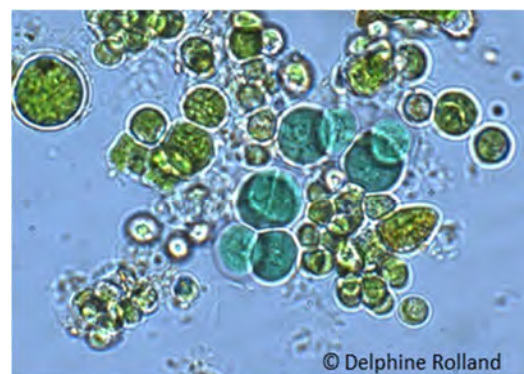
Les cyanobactéries ont été les premiers organismes capables de photosynthèse « oxygénique » (production de matière organique et d'oxygène à partir d'eau et de dioxyde de carbone) apparus sur Terre, et sont en grande partie à l'origine de l'augmentation de l'oxygène atmosphérique il y a plus de 2 milliards d'années.

Ce sont des **organismes ubiquistes qui colonisent tous les milieux**: les lacs, rivières, estuaires et océans mais aussi les sols et les environnements extrêmes tels que les sources géothermales, les déserts, les environnements polaires et alpins, les eaux très acides ou fortement salées. **Beaucoup d'espèces de cyanobactéries peuvent former des symbioses** avec un large éventail d'hôtes eucaryotes, y compris les champignons, les plantes et les animaux tels que les éponges, les ascidies et les coraux.

Lorsqu'elles colonisent la colonne d'eau des écosystèmes aquatiques, les cyanobactéries **font partie du phytoplancton** ● au même titre que les **microalgues eucaryotes**.

Le terme «cyano- », dérivé du grec, découle de la présence de **pigments photosynthétiques** ● qui confèrent un aspect bleuté aux cyanobactéries (**Fig.1**).

Figure 1. Microphotographie d'un échantillon de phytoplancton. Comparaison de couleur entre des cellules cyanobactériennes (bleues-vertes, au centre) et des cellules de chlorophycées.



© Delphine Rolland

2. TERMINOLOGIE

La classification des organismes vivants et la terminologie qui lui est associée est un domaine qui évolue, et de nombreux points font l'objet de débats. Cela ne fait pas exception dans le cas des cyanobactéries.

Les cyanobactéries étaient auparavant référencées comme « cyanophytes » ou « **algues bleues** », car elles sont capables de photosynthèse comme les plantes. Or, à la différence de l'ensemble des autres groupes de microalgues, les cyanobactéries sont des organismes **procaryotes** (bactéries et archées), c'est-à-dire dépourvues de noyau délimité par une membrane et d'organelles tels que les chloroplastes et mitochondries. **Il est donc suggéré d'adopter de préférence la terminologie de « cyanobactérie »** au lieu d'algue bleue, afin de clairement mettre en évidence le fait que ces organismes **appartiennent au domaine des bactéries** (Fig. 2).

Les termes « algues » et « microalgues » n'ayant pas de définition **taxonomique** claire et constituant un ensemble d'organismes capables de photosynthèse appartenant à des groupes très différents, il est toutefois accepté de considérer les cyanobactéries comme des « **microalgues procaryotes** ». Par conséquent, par souci de simplification, nous utiliserons ici le terme de microalgues en considérant qu'il englobe les cyanobactéries.

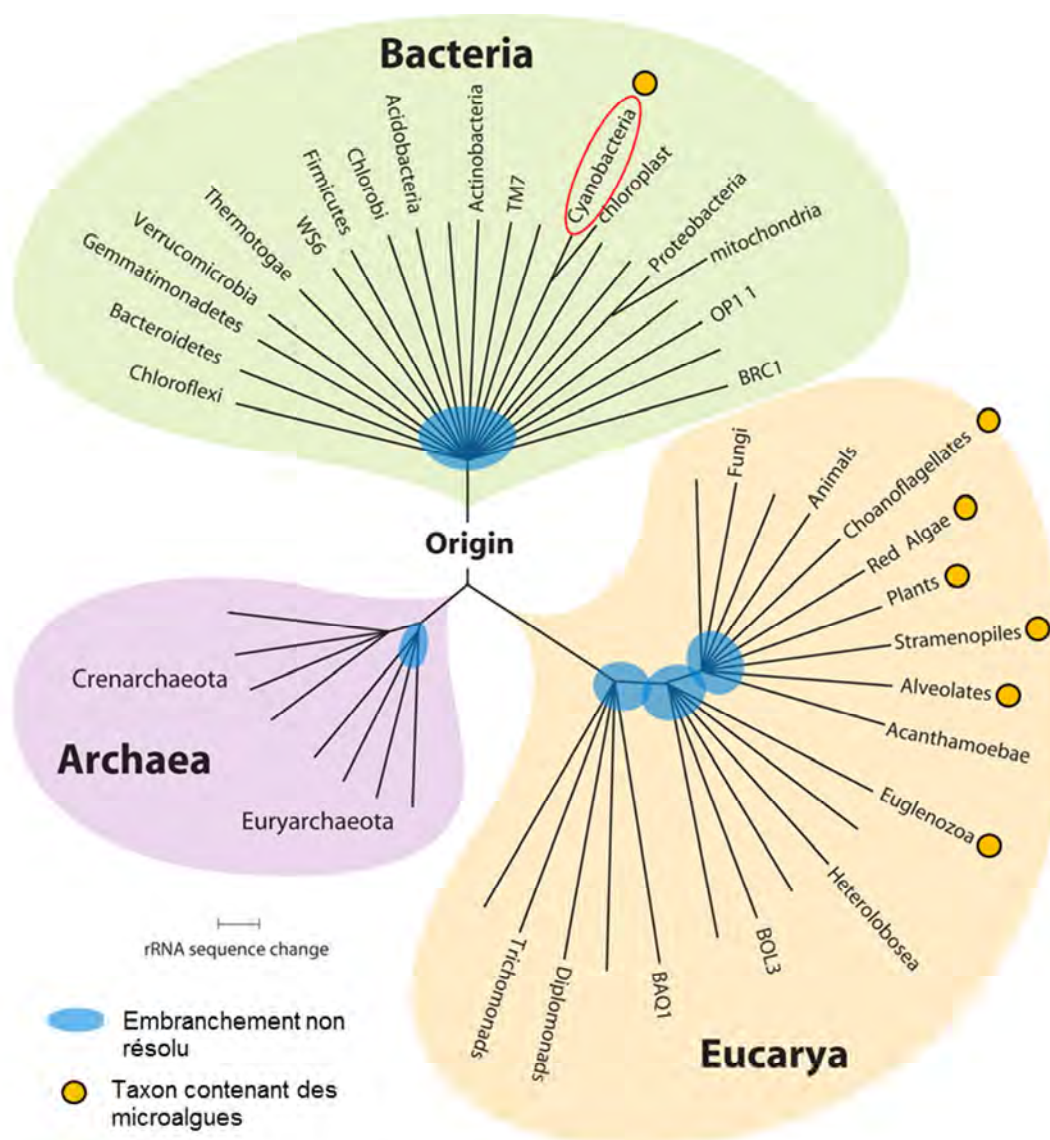


Figure 2. Emplacement des cyanobactéries au sein de l'arbre phylogénétique des trois domaines du monde vivant (adapté de Pace 2009).

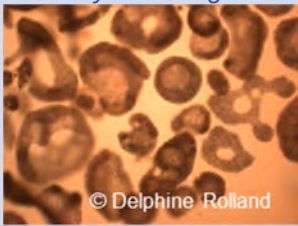
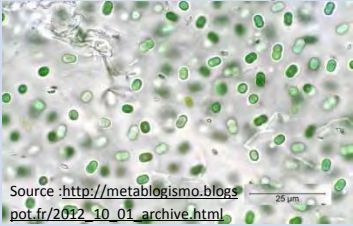
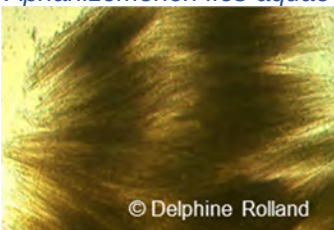
3. CLASSIFICATION

Les cyanobactéries comptent environ **2000 espèces** réparties dans **150 genres**. Elles présentent une grande variété de formes et de tailles, allant des formes unicellulaires telles que *Synechococcus* (à peine visibles sous le microscope) aux longs filaments d'*Anabaena* (parfois suffisamment grandes pour être visibles à l'œil nu).

La caractérisation taxonomique des cyanobactéries a longtemps été réalisée par l'étude des **critères morphologiques**. Cependant, les techniques de séquençage des gènes sont de plus en plus utilisées pour différencier les cyanobactéries jusqu'au genre et parfois jusqu'à l'espèce. **Ces techniques moléculaires** ont parfois révélé des incohérences par rapport aux classifications basées uniquement sur la morphologie.

La classification la plus couramment utilisée aujourd'hui est celle de **Komáreck et Anagnostidis** (1998, 2005) divisée en 4 ordres. Elle est basée sur la morphologie générale en appui aux données de séquences de gènes. Les critères taxonomiques sont nombreux et intègrent entre autres : la présence ou l'absence de cellules spécialisées, la présence ou l'absence de ramification des filaments, et le mode de reproduction des cyanobactéries (**Tableau. 1**).

Tableau 1. Classification en 4 ordres des cyanobactéries : caractéristiques générales et espèces représentatives.

Ordre	Caractéristiques	Espèces représentatives en eaux douces	Espèces représentatives en eaux marines
Chroococcales	Cellules sphériques. Solitaires ou formant des colonies en plaques ou sphériques. Se reproduisent par fission binaire ou bourgeonnement.	<i>Microcystis aeruginosa</i>  © Delphine Rolland	<i>Synechococcus elongatus</i>  Source : http://metablogismo.blogspot.fr/2012_10_01_archive.html
Oscillatoriales	Filaments droits ou en spirales ne portant pas de ramifications. Sans hétérocystes et/ou akinètes.	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>  © Delphine Rolland	<i>Trichodesmium thiebautii</i>  Source : http://www.whoi.edu/page.do?pid=83518&tid=4142&cid=32014&i=8
Nostocales	Filaments droits ou en spirale ne portant pas de ramifications. Avec hétérocystes et/ou akinètes.	<i>Anabaena flos-aquae</i>  © Delphine Rolland	<i>Nodularia spumigena</i>  Source : http://oceandatacenter.ucsc.edu/PhytoGALLERY/Freshwater/Nodularia.html
Stigonematales	Filaments portant des ramifications. Avec hétérocystes et/ou akinètes.	<i>Espèces surtout retrouvées en milieux extrêmes sous forme de biofilms ou dans les sols tropicaux.</i>	

En terme écologique, trois grands groupes de cyanobactéries sont souvent considérés :

- Les espèces benthiques, sous forme de **biofilms**, **tapis** ou **agrégats** recouvrant les rochers, les sédiments et les plantes submergées (ex. *Spirulina*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, **Fig.3**)
- Les espèces **planctoniques coloniales**¹ et **filamenteuses** formant des efflorescences (ex. *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, voir **fiche C6**), caractéristiques des eaux plutôt chaudes comme dans les lacs stratifiés des régions tempérées ou des régions chaudes.
- Les espèces **picoplanctoniques** unicellulaires (ex. *Synechocystis*, *Crocospaera*, *Synechococcus*, *Prochlorococcus*), de taille généralement inférieure à 3-4 µm et qui ont tendance à dominer les systèmes pauvres en nutriments, que ce soit en milieu d'eau douce ou marin.

Figure 3. Formes benthiques des cyanobactéries. Haut : Tapis microbien constitué de *Spirulina* et *Phormidium* dans une source chaude, Parc National de Yellowstone (Etats-Unis). Bas : Cyanobactéries filamenteuses périphytiques attachées aux roches en bordure de berge, Bretagne.



4. ECOPHYSIOLOGIE ET CARACTERISTIQUES CELLULAIRES

Au même titre que tous les organismes phototrophes, la survie et la croissance des cyanobactéries est dépendante des ressources disponibles dans le milieu, plus particulièrement l'**énergie lumineuse** nécessaire pour la photosynthèse, les **macronutriments** (C, N, P) et les **éléments traces** (Fe, Mn, Zn) nécessaires aux diverses activités métaboliques, et une **température optimale** pour leur croissance. La plupart des cyanobactéries ont un optimum de température d'au moins quelques degrés de plus par rapport à celle des microalgues² (Paerl et Huisman, 2008).

Cependant, la dynamique des différents taxons de cyanobactéries est très variable et dépendante de leurs propriétés **écophysiologiques**. La **présence de structures cellulaires et d'inclusions ayant des fonctions spécialisées leur confèrent des avantages compétitifs qui contribuent largement à leur succès écologique**. Plusieurs exemples sont listés ci-dessous :

4.1. Capture de la lumière

Les centres réactionnels situés au sein des membranes photosynthétiques des cellules cyanobactériennes comprend de la **chlorophylle-a** et des **caroténoïdes** comme la plupart des organismes photosynthétiques. Mais contrairement aux microalgues eucaryotes (sauf les algues rouges), les **pigments majeurs** impliqués dans la capture de l'énergie solaire sont des **phycobiliprotéines**, dont il existe trois formes principales :

- L'**allophycocyanine**, qui constitue le cœur des complexes de capture de la lumière,
- la **phycocyanine** qui confère un aspect bleuté aux cyanobactéries,
- la **phycoérythrine**, pigmentée rouge.

Ces phycobiliprotéines permettent aux cyanobactéries d'exploiter un spectre plus large de longueurs d'onde de la lumière visible (qui s'étend de 400 à 700 nm) que les microalgues eucaryotes (**Fig. 4**).

Le mélange des différents pigments photosynthétiques induit des variations de couleurs des cellules allant du brun-rougeâtre au bleu-vert, vert émeraude, bleu foncé et parfois même presque au noir (la couleur prédominante en eau douce étant le bleu-vert).

1. Ce groupe comprend des picocyanobactéries coloniales (ex. *Snowella*, *Aphanocapsa*, *Merismopedia*, *Chroococcus*) qui peuvent être abondantes dans les plans d'eau mésotrophes à eutrophes.

2. Certaines exceptions existent cependant, telles que le genre *Planktothrix* qui présente un optimum de température assez bas comparé aux autres cyanobactéries.

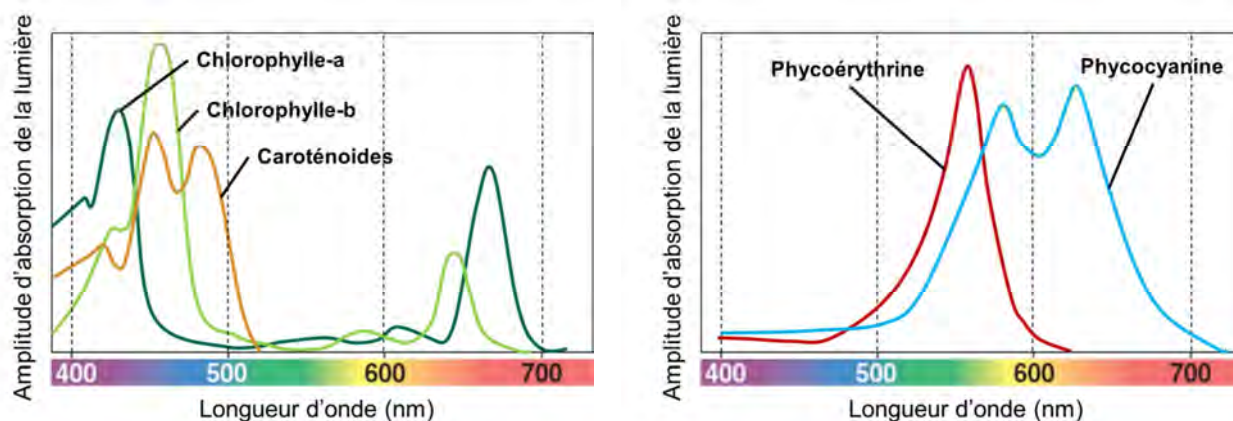


Figure 4. Spectres d'absorption de la lumière des différents pigments de cyanobactéries. Gauche : les chlorophylles et les caroténoïdes, communs à la plupart des organismes photosynthétiques. Droite : la phycoérythrine et la phycocyanine, pigments supplémentaires spécifiques des cyanobactéries.

4.2. Protection contre les UV

Des niveaux élevés de lumière peuvent inhiber ou endommager les centres réactionnels de la photosynthèse, mais aussi affecter le métabolisme des espèces phytoplanctoniques. Cependant, **les cyanobactéries ont développé un très grand nombre de stratégies de protection contre les méfaits des rayons ultraviolets.**

Par exemple, plusieurs espèces de cyanobactéries (notamment *Nostoc*, *Calothrix* et *Gloeocapsa*) présentent des écrans anti-UV au niveau de leur membrane externe. De plus, les pigments caroténoïdes sont très efficaces pour la protection contre les UV (Vincent et Quesada, 2012). Il existe aussi des **défenses contre la photo-oxydation** et des mécanismes de réparation des dommages causés par les UV au niveau des centres réactionnels et de l'ADN (Vincent et Quesada, 1993).

4.3. Flottabilité

Plusieurs genres de cyanobactéries planctoniques d'eau douce (ex. *Microcystis*, *Anabaena*) et marines (ex. *Trichodesmium*) peuvent migrer verticalement de façon active par l'intermédiaire de **vacuoles gazeuses** (Fig.5) **qui leur fournissent un potentiel de flottabilité** lorsque la colonne d'eau est stratifiée. Grâce à une densité ainsi réduite, les cyanobactéries peuvent atteindre la surface de la colonne d'eau, là où les conditions de luminosité sont plus avantageuses pour effectuer la photosynthèse. Ce pouvoir de flottabilité leur confère un avantage compétitif comparé à de nombreux groupes de microalgues qui subissent la sédimentation du fait de leur densité plus élevée.

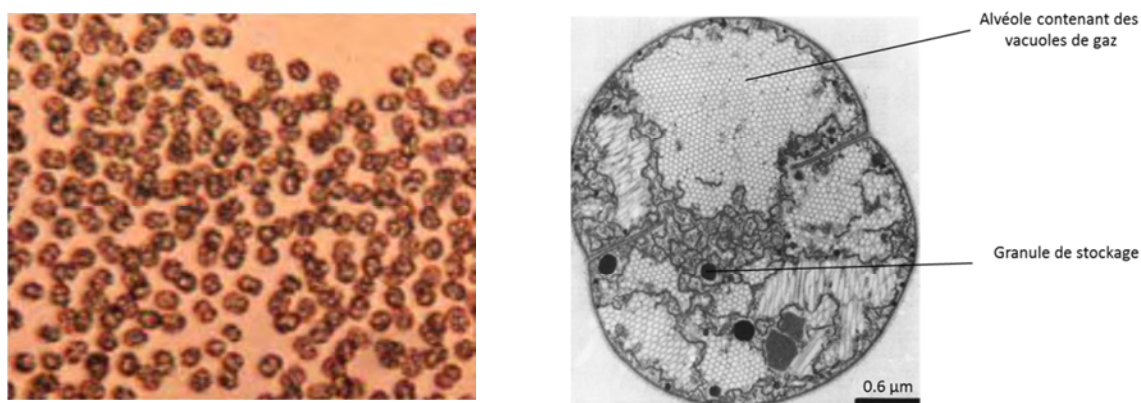


Figure 5. Les vacuoles gazeuses permettant la flottabilité des cyanobactéries. Gauche : colonie de *Microcystis* sp. présentant des vacuoles de gaz (taches blanches à l'intérieur des cellules). Droite : gros plan d'une cellule de *Microcystis* contenant des vacuoles de gaz (Microphotographie de H. S. Pankratz).

4.4. Fixation d'azote atmosphérique

Certaines cyanobactéries ont la capacité de synthétiser la nitrogénase, une enzyme responsable de la fixation d'azote atmosphérique et de la conversion de l'azote gazeux (N_2) en ammonium (NH_4^+) puis en acides aminés. Cette enzyme ne peut fonctionner qu'en absence d'oxygène dans la cellule. **Toutefois, plusieurs adaptations rendent possible la fixation de l'azote atmosphérique (N_2) en milieu aérobie**³:

- Les cyanobactéries appartenant aux ordres des Nostocales et Stigonematales effectuent la fixation de N_2 dans des cellules spécialisées (5 à 10% des cellules) appelées « **hétérocystes** » (Fig.6).
- En milieu marin, la fixation de N_2 se fait surtout par des cyanobactéries ne possédant pas d'hétérocystes mais ayant adopté des adaptations diverses. Par exemple, pour le genre *Gloeothoece*, l'hypothèse la plus probable est que la fixation d' N_2 se fait exclusivement la nuit, en l'absence de production d'oxygène par photosynthèse (Gallon., 1992).

Cette capacité confère aux cyanobactéries **un avantage compétitif lorsque l'azote dissous devient limitant** dans la colonne d'eau puisqu'aucune microalgue eucaryote connue à ce jour n'est capable de fixer l'azote atmosphérique.

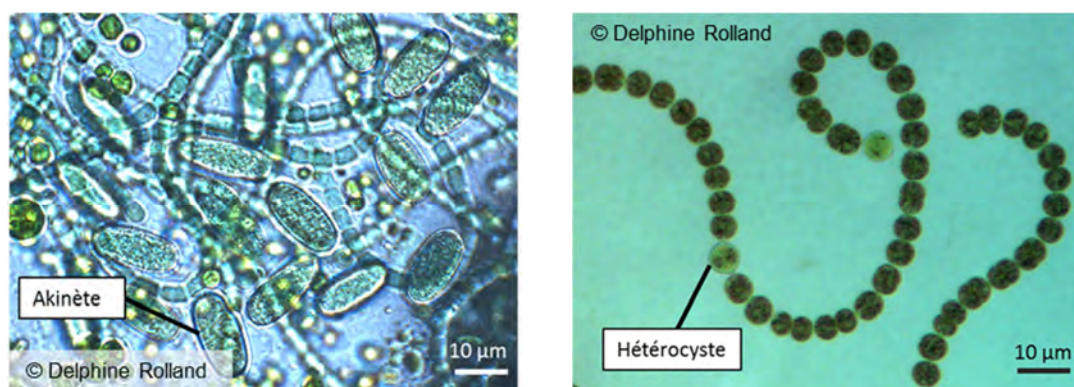


Figure 6. Les cellules spécialisées des Nostocales. Gauche : Trichomes de *Cyindrospermum majus* avec akinètes. Droite : Trichome d'*Anabaena flos-aquae* avec hétérocystes.

4.5. Réserves

Les cyanobactéries contiennent **plusieurs formes d'inclusions leur permettant de stocker des nutriments en excès** dans l'eau.

- L'**azote** en excès peut être stocké sous forme de **phycocyanine** ou de **cyanophycine**. Ces réserves d'azote sont ensuite puisées en priorité, avant la fixation de N_2 atmosphérique, lors des périodes d'insuffisance des ressources.
- Le **phosphore** en surplus dans le milieu peut aussi être **accumulé dans des granules de polyphosphates** (Fig. 5), phénomène qui est toutefois observé chez plusieurs autres microalgues.
- Le **carbone** produit lors de la photosynthèse **est stocké sous forme de granules de glycogène**.

Toutes ces réserves peuvent ensuite être utilisées pour le maintien de la viabilité et la croissance lorsque les conditions de ressources sont inadéquates.

4.6. Dormance

Les cyanobactéries ont la capacité de **rester en dormance dans les sédiments (phase benthique)** lorsque les conditions sont défavorables à leur survie et leur croissance, par exemple pendant l'hiver. Cette « hibernation » est rendue possible par l'intermédiaire de la formation de cellules spécialisées aux parois épaissies appelées **akinètes**, dans le cas des Nostocales et Stigonematales (Fig. 6), ou par la formation de **cellules végétatives** spécialisées dans le cas des Chroococcales. Lors de cette phase benthique, les conditions physiologiques et la structure des cellules sont conservées et restent comparables à celles des formes planctoniques. Ainsi, ces cellules de dormance peuvent former une « **banque de graines** » dans les sédiments et permettre une recolonisation rapide de la colonne d'eau quand les conditions redeviennent favorables.

3. Les cyanobactéries benthiques formant des biofilms et tapis microbiens affleurant dans les zones très peu profondes peuvent fixer l'azote atmosphérique sans adaptations spécifiques car ces microenvironnements sont la plupart du temps très pauvres en oxygène.

4.7. Protection contre la prédation



La prédation par le zooplancton (= **broutage**) peut avoir un impact important sur les populations de phytoplancton, y compris en ce qui concerne les cyanobactéries.

Cependant, beaucoup de cyanobactéries ont **des caractéristiques spécifiques qui les rendent moins consommables** que les autres groupes phytoplanctoniques :

- Les grands filaments de cyanobactéries ou les larges colonies peuvent **interférer mécaniquement** avec les brouteurs **en raison de leur taille ou de la présence d'un mucilage**.
- Certaines toxines produites par les cyanobactéries (**cyanotoxines**) ont une fonction **allélopathique**, c'est-à-dire de protection contre les brouteurs.

5. PROLIFERATION ET TOXICITE

Les cyanobactéries peuvent perturber le fonctionnement des écosystèmes aquatiques lorsqu'elles prolifèrent, favorisées par des déséquilibres écologiques (dont l'eutrophisation des eaux). Certaines souches peuvent libérer des **cyanotoxines**, parfois mortelles pour les animaux et pour l'Homme. Cette problématique est plus amplement détaillée dans la **fiche C2**.

RÉFÉRENCES

- Bellinger E.G., et Sigee D.C.** (2010). *Freshwater algae, Identification and use as bioindicators*. Chichester: John Wiley and Sons, Ltd. Nb. 255p.
- Carey C. C., Ibelings B. W., Hoffmann E. P., Hamilton D. P., et Brookes J. D.** (2012). *Ecophysiological adaptations that favor freshwater cyanobacteria in a changing climate*. Water Research, 46: 1394-1407.
- Gallon J.R.** (1992) *Tansley review no.44. Reconciling the uncompatyible: N₂ fixation and O₂*. New phytology, 122: 571-609.
- Kaplan-Levy R. N., Hadas O., Summers M. L., Rucker J., et Sukenik, A.** (2010). *Akinetes: dormant cells of cyanobacteria*. Dans: Lubzens E., Cerda J., et Clark M.S. (Ed.), Dormancy and resistance in harsh environments. Heidelberg: Springer. Volume 21.
- Komárek J., et Anagnostidis K.** (1998): *Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales*. Dans: Ettl H., Gärtner G., Heynig H., et Mollenhauer D. (Ed.): Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/1, Gustav Fischer, Jena-Stuttgart-Lübeck-Ulm, 548 pp.
- Komárek J. & Anagnostidis K.** (2005): *Cyanoprokaryota 2. Teil/ 2nd Part: Oscillatoriales*. Dans: Büdel B., Krienitz L., Gärtner G., et Schagerl M. (Ed.): Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/2, Elsevier/Spektrum, Heidelberg, 759 pp.
- Pace N.R.** (2009) *Mapping the tree of life: progress and prospects*. Microbiology and molecular biology reviews, 73: 565-576.
- Paerl H. W., et Huisman J.** (2008). *Blooms like it hot*. Science, 320: 57-58.
- Van den Hoek C., Mann D. G., et Jahns H. M.** (1995). *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge: Cambridge University Press. 455p.
- Vincent W. F.** (2009). *Cyanobacteria*. Dans: Likens G.E. (Ed.), Encyclopedia of inland waters. Oxford: Academic Press. p. 226-232.
- Vincent W. F., et Quesada A.** (1993). *Cyanobacterial response to UV radiation: implications for antarctic microbial ecosystems*. Dans: Weiler S., et Penhale P.A. (Ed.), Ultraviolet radiation in Antarctica: Measurements and biological effects. Washington: American Geophysical Union. p.111-124.
- Vincent W. F., et Quesada A.** (2012). *Cyanobacteria in high latitude lakes, rivers and seas*. Dans: Whitton B.A. (Ed.), Ecology of cyanobacteria II: their diversity in time and space. London: Springer.p. 371-386.
- Watson S. B.** (2003). *Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: Signals or byproducts? A review of their biological activity*. Phycologia, 42: 332-350.
- Whitton B.A.** (2012). *Ecology of cyanobacteria II: their diversity in time and space*. London: Springer.750p.

C2. PROLIFERATION DES CYANOBACTERIES : DEFINITION ET CAUSES

CE QU'IL FAUT RETENIR

- Les **efflorescences de cyanobactéries** se manifestent sous **différentes formes** (écumes, mousse, opacité et coloration de l'eau, dépôt sur berge).
- La **chaleur** et la **stabilité de la colonne d'eau** sont des conditions favorisant les proliférations de certaines espèces de cyanobactéries planctoniques.
- L'**eutrophisation** des milieux, et plus particulièrement l'enrichissement en **phosphore** favorise les proliférations de cyanobactéries.
- La **répartition spatiale et temporelle** des efflorescences de cyanobactéries s'effectue à différentes échelles, ce qui a une incidence sur le prélèvement d'échantillons d'eau et leurs analyses.
- Les cyanobactéries peuvent **produire des toxines et causer des nuisances écologiques, sanitaires et économiques** (cf. **fiche C3**).

1. INTRODUCTION

Lorsque certaines espèces de cyanobactéries prolifèrent de façon massive, elles créent des **efflorescences** (ou « **blooms** »). Dans cette situation, la densité de cellules est suffisamment importante pour que le phénomène soit visible à l'œil nu. Cette densité peut être d'une dizaine de milliers à plusieurs millions de cellules par millilitre.

2. LES DIFFERENTES FORMES D'EFFLORESCENCES DE CYANOBACTERIES

Les efflorescences de cyanobactéries prennent différentes formes (**Fig.1**), parfois difficiles à différencier des proliférations d'autres groupes de végétaux aquatiques ou des dépôts de pollens et de spores.

Lorsque les efflorescences se forment à la surface de l'eau, on parle alors d'« **écumes** ». De différentes teintes et textures, elles ont un aspect de **peinture irisée** ou de **mousse verdâtre** (ou **bleuâtre** si les cellules sont en fin de vie). Les écumes résultent de la migration des cellules cyanobactériennes à la surface de la colonne d'eau lorsque les conditions sont calmes, puis d'une accumulation de ces cellules au niveau des rives par l'intermédiaire de l'action du vent.

Les écumes sont donc une conséquence de la prolifération de cyanobactéries qui forment **des colonies flottantes** (ex. *Microcystis*, *Anabaena* et *Aphanizomenon*) et de conditions environnementales particulières. Cette forme d'efflorescences est la plus signalée, plus particulièrement dans les **écosystèmes d'eau douce stagnante**, mais aussi **parfois dans certaines zones côtières** (ex. de la Mer Baltique) ou lagunaires.

En zone océanique, seule la cyanobactérie filamenteuse coloniale *Trichodesmium* est connue pour former des proliférations par mer calme en zone tropicale. Les efflorescences de cet organisme se manifestent par des trainées à la surface de l'eau détectables par satellite et pouvant couvrir des milliers de km².

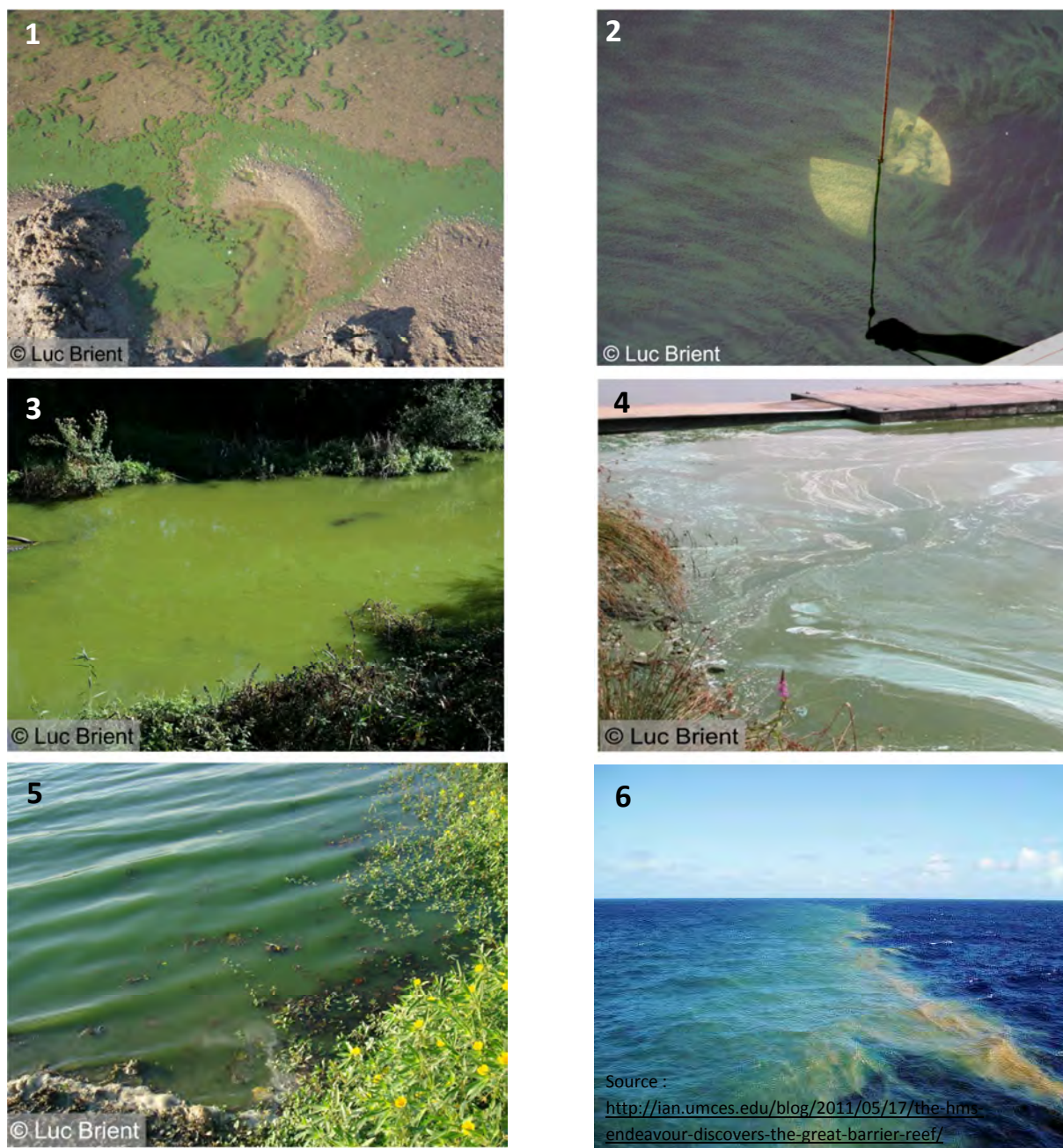


Figure 1. Différentes formes d'efflorescences de cyanobactéries : (1) Accumulation en berge, (2) efflorescence à la surface de la colonne d'eau, (3) écume à dominance verte, (4) écume irisée à dominance turquoise, (5) eau colorée et opaque, (6) trainée de *Trichodesmium* en mer.

L'absence d'écume ne traduit pas une absence de prolifération de cyanobactéries. Par exemple, d'autres espèces telles que *Planktothrix agardhii* ou *Limnolthrix redekei* en eau douce ne forment pas de colonies flottantes mais peuvent tout de même proliférer et rester dispersées de façon homogène plus en profondeur dans la colonne d'eau. Dans ce cas, la prolifération se traduira par une **coloration et une opacité** de la colonne d'eau ou par l'observation de **colonies en suspension** visibles à l'œil nu (petites boules pour *Microcystis* ou impression d'herbe coupée pour *Aphanizomenon*).

Ces proliférations perturbent le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, mais aussi causent des problèmes sanitaires par **la production de toxines et d'autres nuisances** (goût et odeur désagréable de l'eau, colmatage) ayant des répercussions **économiques et sociales**. Dans ce cas, on parle de '**Harmful Algal Blooms**' ♦ (HAB), c'est-à-dire d'efflorescences **nuisibles ou nocives**.

La problématique des cyanobactéries est plus marquée dans le contexte des eaux douces, du fait de son impact sanitaire sur l'**eau potable** et les **eaux récréatives** (cf. **fiche C3**). Toutefois, il est noté une expansion d'efflorescences nuisibles de cyanobactéries dans les eaux côtières du monde entier. La prolifération de cyanobactéries toxiques marines ayant le plus souvent lieu dans les zones tropicales et subtropicales du globe, le problème sera traité majoritairement vis-à-vis de l'eau douce et en milieu tempéré dans les paragraphes qui suivent.

3. REPARTITION SPATIALE DES EFFLORESCENCES DE CYANOBACTERIES

3

Étant donné que certaines espèces de cyanobactéries peuvent migrer verticalement dans la colonne d'eau, être poussées par le vent ou les courants et former des couches denses de biomasse à des profondeurs variables, **différents cas de figure de distribution spatiale sur le plan horizontal, mais aussi vertical, sont observés (Fig. 2).**

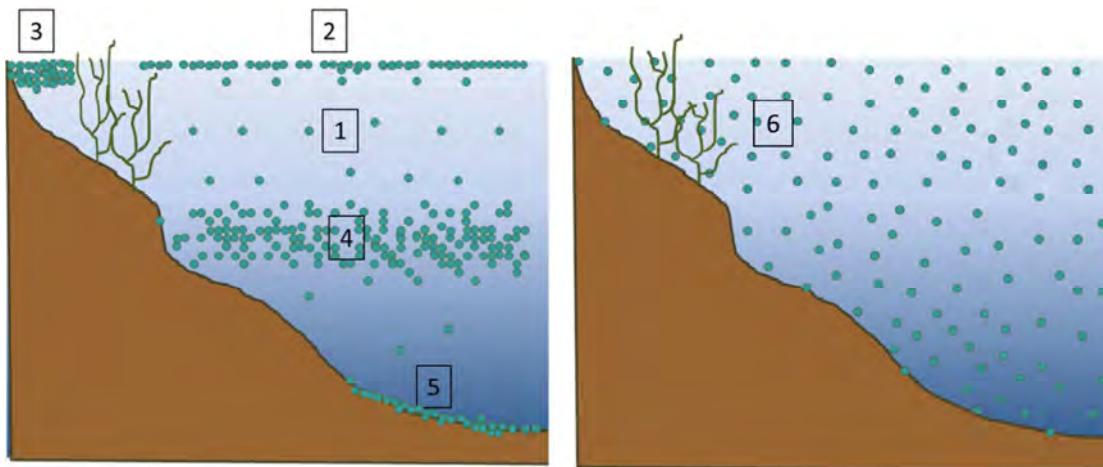


Figure 2. Schéma illustrant les répartitions possibles des cyanobactéries dans la colonne d'eau d'un lac stratifié. Gauche : pendant la saison de stratification (été). Droite : pendant la saison de mélange. Les nombres font référence à : (1) cellules dispersées dans la couche de surface, (2) écume à la surface de l'eau par temps calme, (3) écume en berge constituée de cellules accumulées par le vent, (4) maximum de biomasse dans une couche intermédiaire, (5) espèces benthiques accumulées à la surface des sédiments, (6) cellules distribuées de façon homogène.

Cette variabilité a d'ailleurs pour conséquence de rendre difficile leur détection et leur suivi. En effet, **certaines méthodes utilisées pour la collecte d'échantillons d'eau destinés à l'analyse des cyanobactéries ne tiennent pas compte de cette variabilité** (ex. récolte avec une bouteille à la surface de l'eau à un seul site), ce qui induit une mésestimation de la densité de cyanobactéries (cf. **fiche G1**).

4. CONDITIONS FAVORISANT LES PROLIFERATIONS DE CYANOBACTERIES

Les efflorescences de cyanobactéries apparaissent généralement dans les **milieux aquatiques lenticques** (lacs, mares, étangs, tronçons de rivière à débit lent), **riches en nutriments** (mésotrophes à hypereutrophes) et durant la **saison estivale** lorsque les températures sont plus élevées.

Bien qu'aucun facteur pris individuellement ne soit en mesure de prédire ou d'expliquer la dominance des cyanobactéries, certaines généralisations peuvent être faites :

4.1. Les conditions climatiques

Une **augmentation des températures** associée avec une **modification des régimes de précipitations** (débits plus faibles, temps de résidence plus long) et de **stratification** du lac (plus de stabilité de la colonne d'eau, moins de mélanges) sont des éléments catalyseurs de la prolifération des cyanobactéries.

Pour quelles raisons?

(1) Une augmentation de l'abondance de cyanobactéries est souvent **associée à des températures élevées** en raison de leur optimum de croissance généralement supérieur aux autres groupes de phytoplancton¹. Les taux de croissance maximaux de la plupart des cyanobactéries sont atteints à des températures entre 20°C et 25°C (Robarts & Zohary, 1987).

(2) Dans des **conditions de faible intensité de mélange**, les vacuoles gazeuses produites par certaines cyanobactéries tels que *Anabaena flos-aquae* et *Microcystis aeruginosa* constituent un avantage concurrentiel par rapport aux autres groupes de phytoplancton puisqu'elles leur permettent d'avoir accès à de meilleures conditions de luminosité en surface.

1. Il existe cependant des cas où les cyanobactéries prolifèrent dans les lacs d'altitude ou pendant l'hiver. C'est le cas par exemple de *Planktothrix mougeotii* qui présente un optimum de température plus bas que celui des autres cyanobactéries.

(3) L'apport de grands volumes d'eau en cas de fortes précipitations conduit à une réduction de la biomasse des cyanobactéries en raison du renouvellement rapide de l'eau, de la dilution et de l'augmentation de la turbidité, cependant parfois compensé par l'apport d'éléments nutritifs provenant du lessivage du bassin versant.

Par conséquent, l'effet des **changements climatiques** sur la dynamique des cyanobactéries dans les écosystèmes aquatiques est un enjeu majeur car certaines études suggèrent qu'ils peuvent induire une augmentation de la fréquence, de la durée et de l'amplitude des efflorescences de cyanobactéries, ainsi qu'une augmentation du développement de souches toxiques.

4.2. Les conditions nutritives

La production de forte biomasse de cyanobactéries requiert une **forte disponibilité en éléments nutritifs** (carbone, azote, phosphore).

Dans les environnements aquatiques continentaux, le facteur limitant de la production de biomasse de phytoplancton (y compris les cyanobactéries) est souvent la disponibilité en phosphore soluble. En effet, **le phosphore est majoritairement sous forme particulaire, donc non assimilable par les microalgues** (cf. **fiche A2**).

Lorsque les conditions climatiques le permettent, l'enrichissement accru des plans d'eau en phosphore (conduisant à l'eutrophisation) est généralement accompagné d'un développement d'efflorescences de cyanobactéries (**Fig.3**).

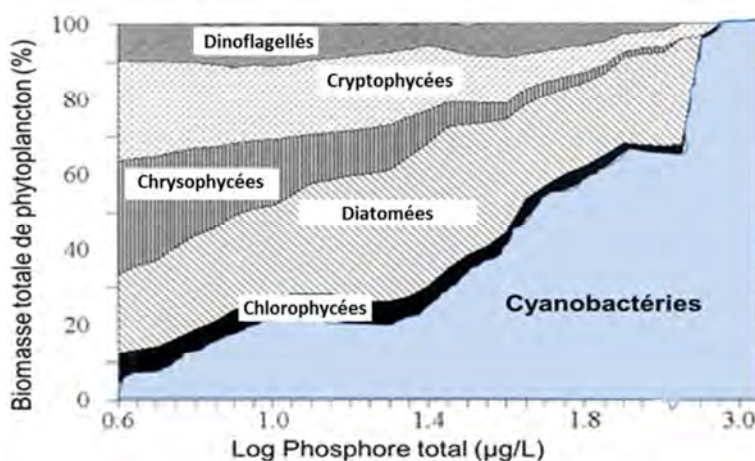


Figure 3. Contribution relative (%) des différents groupes taxonomiques par rapport à la biomasse phytoplanctonique totale, en fonction de la concentration en phosphore total (relation empirique établie sur 91 lacs au Canada; d'après Watson et al., 1997).

La disponibilité en azote est généralement de moindre importance, et même si beaucoup d'études ont suggéré qu'un faible rapport azote/phosphore pouvait être un facteur favorable à la dominance des cyanobactéries, **c'est plutôt une relation statistique qui a été établie et non une relation de cause à effet** (c'est-à-dire que les expériences en laboratoire n'ont pas validé cette hypothèse pour le moment et que ces suggestions se basent sur une moyenne d'observations de terrains).

5. VARIATIONS TEMPORELLES DES EFFLORESCENCES DE CYANOBACTERIES

➤ A l'échelle journalière :

Les cyanobactéries ont tendance à **apparaître en surface tôt le matin**, ce qui leur permet de capter les rayons lumineux et d'effectuer la photosynthèse. Elles vont s'enfoncer ensuite légèrement en dessous de la surface vers midi, évitant ainsi la photo-inhibition par les rayons du soleil (**Fig.4**).

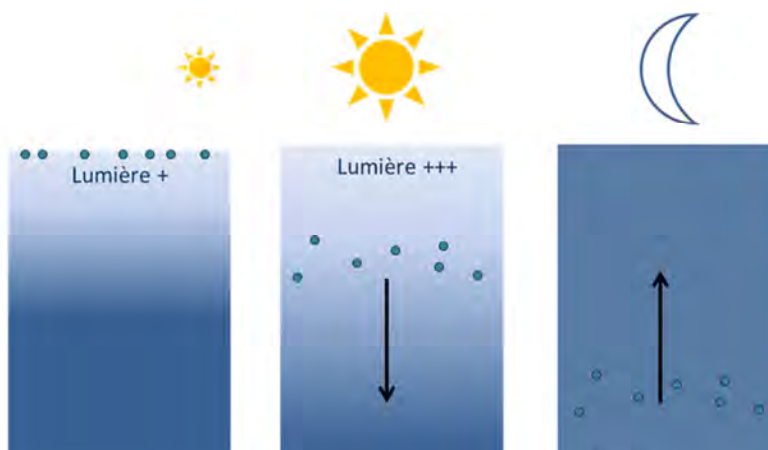
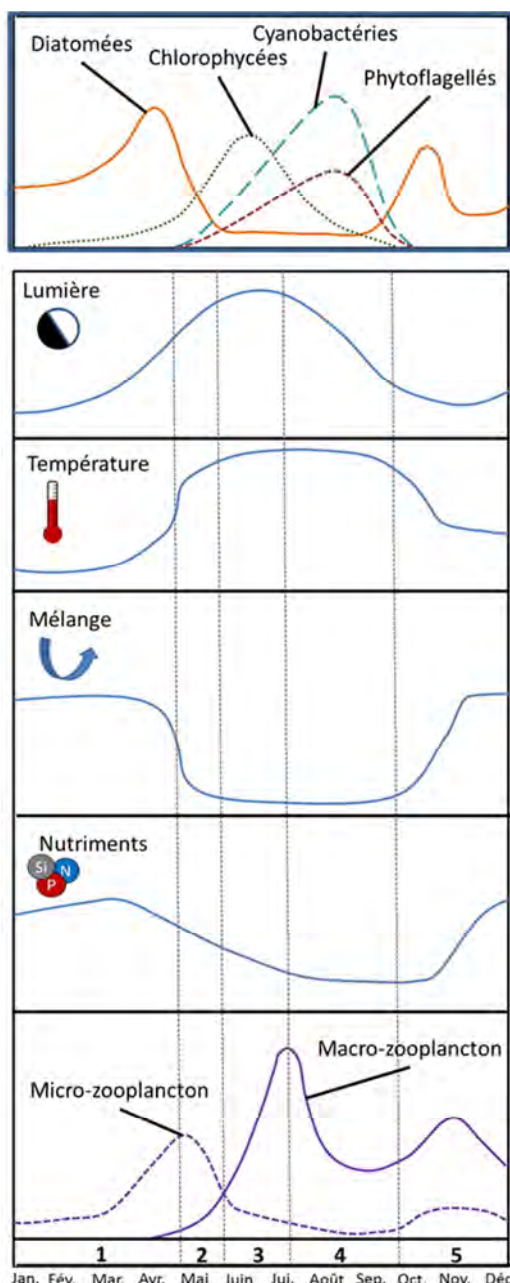


Figure 4. Régulation de la position des cyanobactéries dans la colonne d'eau.

La migration verticale active des cellules dans la colonne d'eau s'explique comme suit : lorsque les cyanobactéries effectuent la photosynthèse en journée, elles s'alourdissent du fait de la production de sucres et les vacuoles de gaz ne peuvent plus compenser l'effet de la sédimentation. A ce moment, les cyanobactéries vont pouvoir tirer parti du fait que les couches d'eau plus profondes sont généralement plus riches en nutriments (faible croissance algale à ce niveau et relargage interne de phosphore contenu dans les sédiments). La nuit, les sucres sont utilisés pour la respiration, les cellules deviennent plus légères et remontent vers la surface grâce à leur vacuoles gazeuses.

Les protocoles d'échantillonnage et de surveillance doivent être effectués en tenant compte de cette variabilité journalière. En effet, dans le cas par exemple d'un plan d'eau destiné aux activités récréatives, la présence de fortes biomasses de cyanobactéries et donc d'un risque sanitaire pour les usagers peut être ignorée si le site est inspecté trop tardivement dans la journée.



➤ A l'échelle saisonnière :

Les cyanobactéries ont tendance à proliférer **pendant l'été dans les zones tempérées (juin à septembre)**, lorsque les températures sont les plus chaudes, la colonne d'eau stratifiée et que les concentrations en nutriments dans la couche de surface sont les plus faibles (**Fig. 5**).

Le modèle classique de **succession phytoplanctonique** dans les plans d'eau **mésotrophes** à **eutrophes** est le suivant :

Diatomées → Chlorophycées → Cyanobactéries et phytoflagellés → Diatomées

Figure 5. Modèle de succession phytoplanctonique dans un plan d'eau mésotrophe à eutrophe en milieu tempéré et variations des conditions environnementales induisant cette succession (modifié d'après Reynolds, 2006).

(1) Hiver et début printemps : les diatomées sont dominantes du fait de leur vitesse de croissance plus importante que les autres groupes phytoplanctoniques, d'un optimum de température plus bas, et de la présence de nutriments – dont la silice nécessaire à l'élaboration de leur frustule – en quantité suffisante.

(2) Printemps : la biomasse de diatomées dans la colonne d'eau diminue suite à une baisse de l'intensité du mélange, un appauvrissement de la concentration en nutriments en surface, mais aussi du fait du broutage par le zooplancton.

(3) Début été : Les chlorophycées profitent des nutriments encore présents dans la colonne d'eau. Celles-ci subissent moins l'effet de la sédimentation et du broutage par le zooplancton du fait de leur forme et de leur taille.

(4) Été : La colonne d'eau étant stratifiée, les cyanobactéries et phytoflagellés sont avantagés par leur capacité de migration active. De plus, la chaleur augmente le potentiel de croissance de ces deux groupes, qui sont également peu consommés par le zooplancton.

(5) Automne : le retour aux conditions mélangées et la diminution de la température induisent une baisse drastique des cyanobactéries et phytoflagellés et un retour des diatomées.

N.B. : L'amplitude des différents pics successifs des groupes de phytoplancton est un indicateur des apports externes (surtout les diatomées et chlorophycées) et internes (surtout les cyanobactéries et phytoflagellés) de nutriments.

➤ A l'échelle pluriannuelle :

Les efflorescences de cyanobactéries **apparaissent soit de manière régulière (tous les étés) ou épisodiquement (variabilité interannuelle)** dans un écosystème aquatique. Cette variabilité aura une incidence importante sur la gestion de la ressource en eau. Il est en effet important d'effectuer des suivis sur le long terme afin d'évaluer correctement le risque d'apparition d'efflorescences en fonction des conditions environnementales (ex. un printemps doux et pluvieux, suivi d'un été précocement et durablement chaud sera plus à risque qu'un été doux et pluvieux).

REFERENCES

- Dokulil M. T., et Teubner K.** (2000). *Cyanobacterial dominance in lakes*. Hydrobiologia, 438: 1-12.
- Paerl H. W., et Huisman J.** (2008). *Blooms like it hot*. Science, 320: 57-58.
- Reichwaldt E. S., et Ghadouani A.** (2012). *Effects of rainfall patterns on toxic cyanobacterial blooms in a changing climate: Between simplistic scenarios and complex dynamics*. Water Research, 46: 1372-1393.
- Reynolds C. S.** (2006). *Ecology of phytoplankton*. Cambridge: University Press. 124p.
- Reynolds C. S., et Walsby A. E.** (1975). *Water-blooms*. Biological Review, 50: 437-481.
- Robarts R. D., et Zohary T.** (1987). *Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration and growth rates of bloom-forming cyanobacteria*. New-Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 21: 391-399.

C3. IMPACTS DES PROLIFERATIONS DE CYANOBACTERIES

CE QU'IL FAUT RETENIR

- L'impact majeur des efflorescences de cyanobactéries est la production potentielle de **cyanotoxines**, dangereuses pour la santé humaine et animale.
- La dominance des cyanobactéries peut ponctuellement engendrer une **diminution de la biodiversité** et des **perturbations du réseau trophique aquatique**, ainsi qu'une **modification des conditions physico-chimiques du milieu**.
- Les efflorescences de cyanobactéries ont aussi une incidence sur la **perception que les usagers ont d'un écosystème** (turbidité, mauvaises odeurs, raréfaction de la faune remarquable).
- Toutes ces nuisances ont des impacts sur la qualité et les usages de l'eau et donc un **coût**, qu'il soit direct ou indirect.

1. IMPACTS ECOLOGIQUES

1.1. Diminution de la biodiversité et perturbation du réseau trophique

Au même titre que les microalgues eucaryotes, les cyanobactéries sont à la base du **réseau trophique** des écosystèmes aquatiques (Fig. 1). Une perturbation à la base de la **chaîne alimentaire** va donc se répercuter jusqu'aux maillons supérieurs.

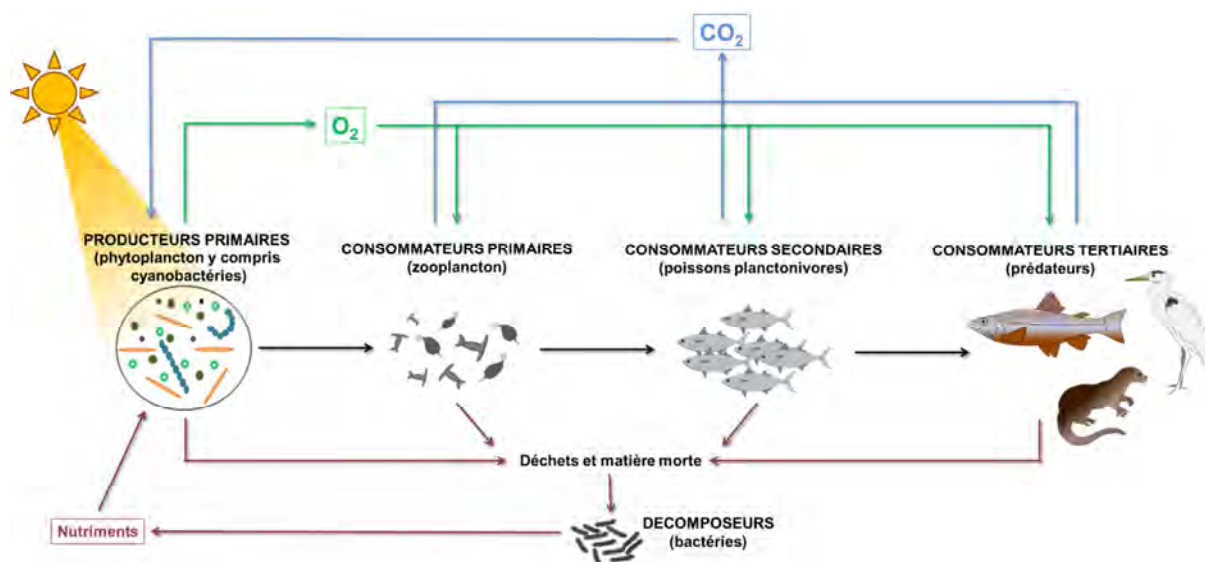


Figure 1. Réseau trophique simplifié des écosystèmes aquatiques. Fléché en noir : chaîne alimentaire. Fléché en rouge : boucle microbienne avec recyclage des nutriments. Fléché en bleu : cycle du carbone. Fléché en vert : cycle de l'oxygène.

Lorsque les cyanobactéries dominent la colonne d'eau, l'espace disponible pour les autres groupes phytoplanctoniques devient limité. De plus, lors d'efflorescences, la lumière pénètre moins profondément dans la colonne d'eau, ce qui a pour conséquence un **effet d'ombrage** et la réduction de la croissance des **producteurs primaires** qui ne peuvent atteindre la surface de l'eau (algues et microalgues benthiques, macrophytes submergés). De plus, certains **métabolites secondaires** produits par les cyanobactéries peuvent provoquer une inhibition de la photosynthèse des plantes supérieures (roseau phragmite, myriophylle, élodée, lentilles d'eau...) ou des microalgues eucaryotes. Par conséquent, il en résulte une **diminution de la biodiversité des producteurs primaires et une modification de la structure de l'habitat**, ce qui a un impact important sur la faune aquatique. En effet, un facteur clé qui détermine le succès de certains poissons est la présence d'un assemblage diversifié de plantes aquatiques.

De plus, les cyanobactéries étant moins '*consommables*' que les autres groupes phytoplanctoniques, leur dominance cause également des **interférences mécaniques et chimiques** sur le zooplancton (cf. **fiche C1** paragraphe 3.6). Le zooplancton n'ayant pas d'autre source de nourriture en cas de dominance des cyanobactéries, il en résulte une diminution de la population, qui se répercute jusqu'aux maillons supérieurs de la chaîne trophique et même parfois créer des **impasses trophiques** (perturbation du transfert d'énergie entre les différents maillons).

La **figure 2** résume les réponses écologiques et les impacts associés aux efflorescences de cyanobactéries dans les lacs, rivières et estuaires.

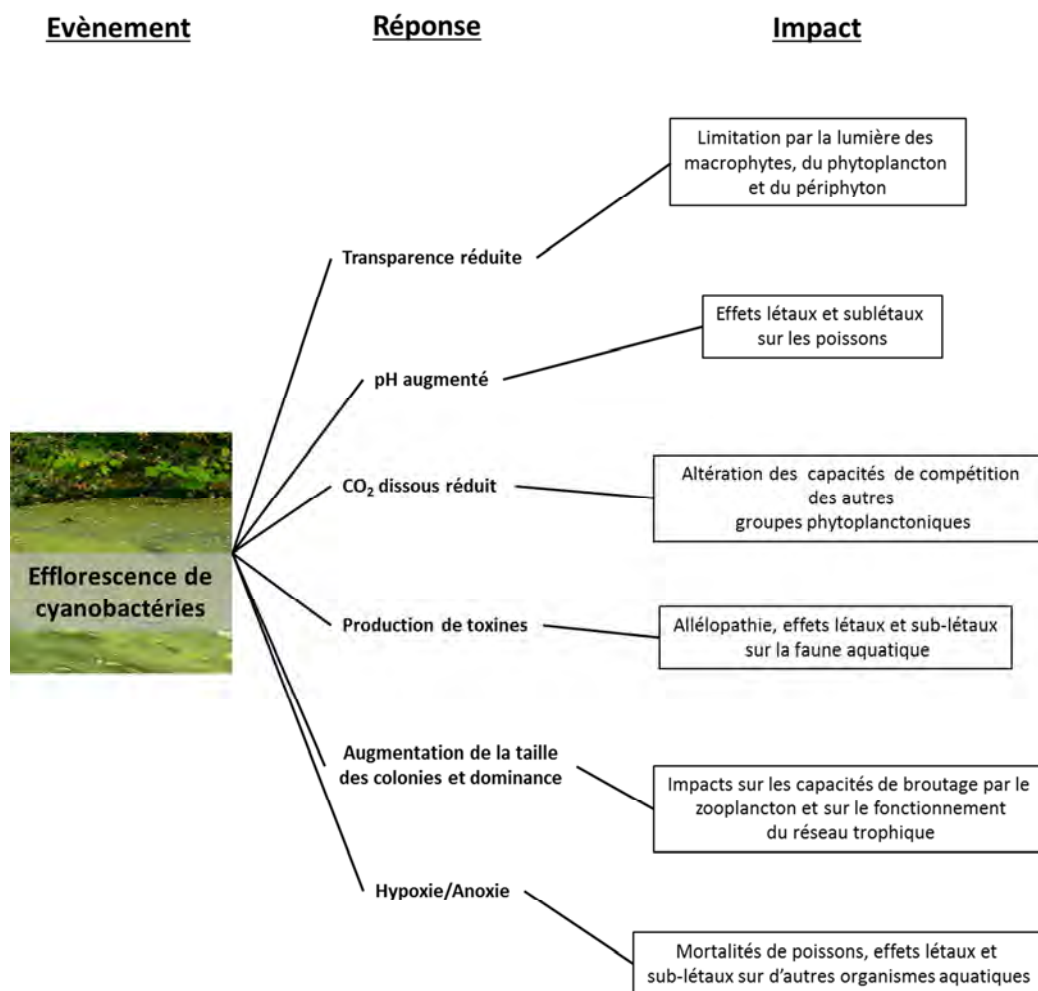


Figure 2. Résumé des réponses écologiques et des impacts associés aux efflorescences de cyanobactéries dans les lacs, rivières et estuaires (modifié d'après Havens, 2008).

1.2. Bioaccumulation de cyanotoxines le long de la chaîne alimentaire

La production de toxines par certaines cyanobactéries (ex. *Anabaena circinalis*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Microcystis aeruginosa*) peut conduire à des **effets létaux et sublétaux** sur la faune aquatique et à la **bioaccumulation de toxines** dans les tissus des invertébrés et des poissons. L'accumulation de **microcystines** (cyanotoxine hépatique) par les bivalves, gastéropodes, crustacés et poissons a été mentionnée dans un grand nombre d'études.

Par exemple, en Bretagne, une étude a révélé que les **mollusques bivalves sont très affectés par la présence de cyanobactéries productrices de microcystines** (Gérard et al., 2009), mais certaines espèces semblent plus résistantes que d'autres. **Les crustacés accumulent aussi des microcystines mais semblent moins sensibles à leurs effets toxiques** que les autres macroinvertébrés, du fait d'une élimination plus efficace.

En laboratoire, **les poissons se montrent globalement moins sensibles** à des expositions de microcystines de concentration proche de celle des milieux naturels. Cependant, les impacts sur les poissons ont été peu étudiés et certaines études en milieu naturel ne vont pas dans ce sens. Une autre étude menée en Bretagne a par exemple révélé une intoxication aux microcystines de 50% des anguilles prélevées dans le bassin versant du Frémur (Côtes d'Armor), affectant leurs conditions physiologiques avant la période de migration (Acou et al., 2008).

L'accumulation de toxines dans les tissus des invertébrés et des poissons est aussi une **voie de toxicité pour leurs prédateurs**. Il a par exemple été démontré en laboratoire que la Grande limnée (gastéropode d'eau douce) transmet la microcystine (accumulé en ingérant *Planktothrix agardhii*) à l'épinoche (Lance et al. 2014). Des cas de mortalité d'oiseaux (cygnes, canards...) ont également été rapportés.

Cependant, en général on observe une diminution des niveaux de toxine observés lors de l'augmentation des niveaux trophiques de la chaîne alimentaire (**biodilution**, contraire de **bioamplification**, Fig.3).

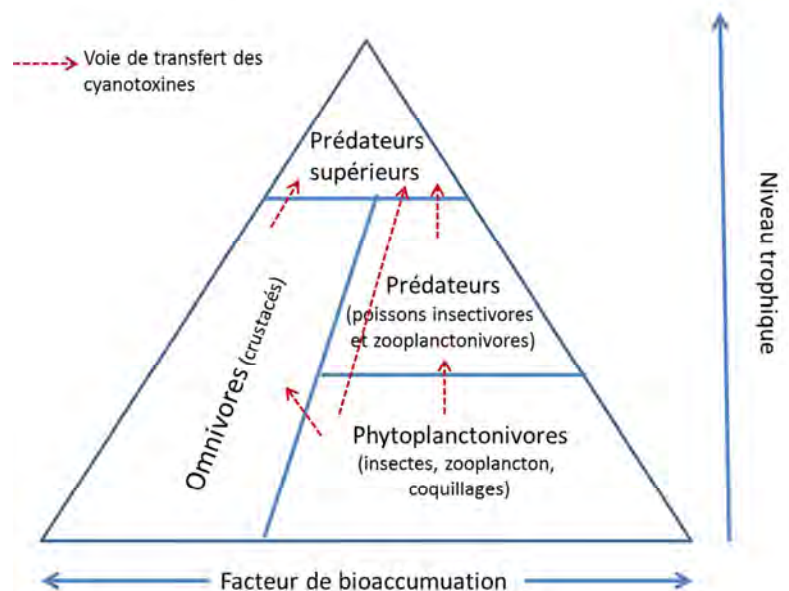


Figure 2. Schéma de la biodilution des cyanotoxines au sein de la chaîne trophique aquatique. A la base du triangle, la bioaccumulation est plus importante qu'à la pointe (modifié d'après Steffensen, 2008).

1.3. Modifications des conditions physico-chimiques

Des concentrations importantes de cyanobactéries peuvent causer une **désoxygénation de la colonne d'eau** due à l'augmentation de la décomposition de la matière organique induisant, entre autres, la mort de nombreux poissons et invertébrés. Les causes et conséquences de ces phénomènes d'hypoxie et d'anoxie sont plus amplement détaillées dans la **fiche A2**.

Durant les proliférations, l'activité photosynthétique des cyanobactéries **épuise le stock de CO₂** de l'eau, ce qui a pour conséquence une augmentation du pH. Une eau à **pH élevé est toxique** pour certaines espèces de poissons.

2. IMPACTS SUR LA QUALITE DE L'EAU

2.1. Présence de cyanotoxines

L'impact majeur des efflorescences de cyanobactéries est sanitaire puisque certaines cyanobactéries synthétisent des **cyanotoxines** qui ont **des effets nocifs sur la santé humaine et animale** suite à leur ingestion ou à un contact cutané. Il existe 3 types principaux de cyanotoxines :

- Les **dermatotoxines** (effet sur la peau)
- Les **hépatotoxines** (effet sur le système hépatique)
- Les **neurotoxines** (effet sur le système nerveux)

Les microcystines, ayant 80 variantes différentes, sont les cyanotoxines les plus communes et sont notamment synthétisées par les genres *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria* et *Nostoc*. L'hépatotoxicité aiguë de la microcystine chez les humains a notamment été mise en évidence suite au décès de 76 patients hémodialysés avec un eau contaminée en 1996 au Brésil (Azevedo et al., 2002).

Il y a cependant **beaucoup plus de cas rapportés concernant les animaux**, et plus particulièrement le décès d'animaux domestiques et de bétail, suite à **l'ingestion d'eau** en bordure de berge, là où s'accumulent des écumes et des cellules de cyanobactéries en senescence. **L'utilisation d'eau contaminée pour l'irrigation** des cultures est aussi un problème potentiel; pour les agriculteurs par contact à l'arrosage et sur les cultures elles-mêmes.

Il est important de mentionner qu'une efflorescence de cyanobactéries n'est pas nécessairement toxique. En effet, **toutes les cyanobactéries ne produisent pas de toxines et une même espèce peut en produire ou ne pas en produire**. Au contraire, de **fortes concentrations en toxines peuvent être mesurées en absence d'efflorescences** ou après une efflorescence. En effet, la présence de souches toxiques dans un écosystème aquatique varie en fonction de plusieurs **facteurs environnementaux**, et il est encore difficile aujourd'hui de déterminer lequel est prépondérant.

Bien que les préoccupations relatives à l'exposition humaine à des toxines aquatiques mettent le plus souvent l'accent sur le **contact direct avec l'eau** (baignade, activités nautiques, ingestion), **l'accumulation dans les aliments** est également une source d'inquiétude. Les cyanotoxines sont des polypeptides ou alcaloïdes qui se lient facilement dans les graisses et chairs des coquillages et des crustacés, rendant leur détection difficile tout en conservant les effets toxiques. La plupart des études et recommandations se focalisent sur les niveaux trophiques supérieurs (c'est à dire les espèces de poissons capturés en pêche sportive). Cependant, un nombre croissant d'études recommandent d'approfondir les recherches concernant les effets de la consommation d'espèces de niveaux trophiques inférieurs (crustacés, coquillages et poissons planctonivores), du fait de plus grandes bioaccumulations à ce niveau (cf. paragraphe 1.2).

Les caractéristiques, les conditions de production et les effets des différentes cyanotoxines sont plus amplement détaillées dans la **fiche C4**.

2.2. Aspect de l'eau

La présence d'efflorescences de cyanobactéries affecte **l'aspect esthétique** d'un plan d'eau par la perte de transparence, la couleur verte de l'eau, la présence d'écume et la production de molécules odorantes ou désagréables au goût telles que la **géosmine** et le **méthylisobornéol**.

3. IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES

Les effets des efflorescences de cyanobactéries sur la qualité de l'eau et l'état écologique des plans d'eau affectent la plupart des usages et ont donc des **conséquences économiques directes ou indirectes**.

3.1. Impacts sur les usages récréatifs

Les usages récréatifs liés à l'eau constituent un élément très important pour les populations locales et le **tourisme**. La présence d'efflorescences de cyanobactéries rend impossible **la baignade, la pêche, ou les activités nautiques**. Cela a un impact sur les acteurs économiques profitant de ces activités, et qui se répercute sur d'autres branches économiques (hôtellerie, restauration). Le développement des cyanobactéries a un impact négatif sur l'attractivité d'un territoire si d'autres activités touristiques ne peuvent être proposées.

3.2. Impacts sur l'agriculture, la ressource piscicole et conchylicole

La perte de bétail mais aussi l'obligation de trouver des sources d'eau alternatives pour **l'irrigation des cultures** cause une perte financière non négligeable pour les exploitants. En France, cette situation n'est pas décrite ou insuffisamment relayée, mais en Australie on a reporté par exemple une douzaine de cas de mortalité de bétail liés aux efflorescences de cyanobactéries (Steffensen et al., 1999).

De même, l'accumulation de toxines dans les tissus des poissons, coquillages et crustacés provenant d'aquacultures ou du milieu naturel constituent une perte de la ressource alimentaire. De plus, la présence de composés odorants ou 'off-flavor' donnent un goût de terre à la chair des poissons et les rend impropres à la consommation.

3.3. Impacts sur la ressource en eau

Les actions à mettre en place pour gérer les impacts des efflorescences de cyanobactéries sur la ressource en eau potable implique de prendre des mesures directement dans le plan d'eau, ou au niveau de la filière de traitement de l'eau potable:

- Au niveau du plan d'eau : la **surveillance** de la qualité de l'eau (échantillonnage, mesures des densités cellulaires, tests de toxicité) mais aussi parfois les mesures de **gestion intrusives** (mélange artificiel, algicides, etc...) représentent un coût matériel et de personnel qualifié.
- Au niveau de la filière de traitement : les produits **additionnels** permettant de détruire les cyanotoxines présentent un coût plus important que les traitements traditionnels. Le décolmatage des filtres obstrués représente aussi un coût important.

De plus, si un traitement adéquat n'est pas possible, il est nécessaire de fournir des **sources d'eau potable alternatives** (réacheminement d'autres sources dans le réseau de distribution ou approvisionnement en bouteilles d'eau).

3.4. Gestion intégrée du bassin-versant

L'intensification des phénomènes d'efflorescences de cyanobactéries étant majoritairement reliée à l'eutrophisation des milieux aquatiques, la réduction des apports externes de nutriments, et plus particulièrement le phosphore, est le premier **facteur de maîtrise** . Dans les impacts économiques, doivent donc être intégrées, les dépenses significatives allouées aux différents programmes d'action de reconquête de la qualité de l'eau dans les bassins versants.

ZOOM SUR LES EFFLORESCENCES DE CYANOBACTÉRIES EN BRETAGNE

En Bretagne, les efflorescences de cyanobactéries sont en général le fait de 5 espèces potentiellement toxiques : *Microcystis aeruginosa*, *Woronichinia naegeliana*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Anabaena spiroïdes*, et *Planktothrix agardhii* (voir fiche d'identité dans **fiche C6**).

Les premiers cas de signalement d'efflorescences de cyanobactéries dans des retenues d'eau en Bretagne datent des années 1980 mais le plus important est celui du Lac de Guerlédan en 1990, dans le Morbihan. Des enfants ayant eu des symptômes de démangeaisons et de rougeurs après une baignade, une prise de conscience a eu lieu à partir de cette date. Plusieurs programmes de suivis ont donc été régulièrement mis en place par la suite sur 30 à 45 sites et ont révélé une généralisation des proliférations à l'ensemble de la région, plus particulièrement dans les grands réservoirs et les canaux. De nombreux plans d'eau sont touchés par le développement des cyanobactéries. Certaines collectivités se voient contraintes à la fermeture totale d'activités récréatives sur leur plan d'eau et cela depuis 2004, date à laquelle le ministère de la Santé en France a fait des recommandations en conformité avec l'Europe sur le paramètre cyanobactéries. Pour exemple, on peut citer les Étangs d'Apigné en Ille-et-Vilaine qui sont régulièrement touchés l'été par des efflorescences, ce qui a pour conséquence l'interdiction ponctuelle des activités de baignades et de loisirs nautiques (dénombrement > 100 000 cellules/mL durant près de 3 semaines cumulées en 2012). Le suivi sanitaire des plans d'eau de loisir et servant à la production d'eau potable est assuré par l'Agence Régionale de Santé (ARS).

REFERENCES

- Acou A., Robinet T., Lance E., Gérard C., Mounaix B., Briant L., Le Rouzic B., et Feunteun E. (2008). *Evidence of silver eels contamination by microcystis-LR at the onset of their seaward migration : what consequences for breeding potential*. Journal of fish biology, 72: 753-762.
- Azevedo, S.M.F.O., Carmichael W.W., Jochimsen E.M., Rinehart K.L., Lau S., Shaw G.R., et Eaglesham G.K. (2002). *Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru, Brazil*. Toxicology, 181-182: 441-446.
- Gérard C., Poullain V., Lance E., Acou A., Briant L., et Carpentier A. (2009). *Influence of toxic cyanobacteria on community structure and microcystin accumulation of freshwater molluscs*. Environmental Pollution, 157:609-617.
- Havens K.E. (2008). *Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems*. Advances in Experimental Medicine and Biology, 619: 733-747.
- Lance E. Petit A., Sanchez W., Paty C., Gerard C., et Bormans M. (2014). *Evidence of trophic transfer of microcystins from the gastropod Lymnaea stagnalis to the Gasterosteus aculeatus*. Harmful Algae, Elsevier, 31:9-17
- Steffensen D.A. (2008). *Economic cost of cyanobacterial blooms*. Advances in Experimental Medicine and Biology, 619:855-865.
- Steffensen D.A., Nicolson B.C., Burch M.D., Drikas M., et Baker P.D. (1999). *Ecology and management of blue-green algae (cyanobacteria) in Australia*. Environmental toxicology and water quality, 14: 183-195.

GLOSSAIRE

Tous les mots marqués par le symbole  dans les fiches sont définis dans le glossaire.

A

Algue

Terme utilisé dans le langage courant décrivant un assemblage d'organismes trouvés dans les environnements marins, saumâtres et d'eau douce et qui sont définis à la fois morphologiquement et physiologiquement.

- Morphologiquement, ce sont des organismes ne possédant pas d'organes différenciés telles que des racines, des feuilles ou des tiges, et leurs cellules reproductrices ne sont pas contenues dans des enveloppes protectrices stériles.
- Physiologiquement, les algues sont fondamentalement [autotrophes](#) ou éventuellement [mixotrophes](#).

Les algues sont des organismes [planctoniques](#) ou [benthiques](#), incluant des organismes [eucaryotes](#) unicellulaires (ex.; diatomées, dinoflagellés) ou pluricellulaires (ex. ; familles des laminaires, famille des ulves). Ce terme comprend les [microalgues](#) et les [macroalgues](#).

Le terme « algues » n'ayant pas de définition taxonomique claire et constituant un ensemble d'organismes capables de photosynthèse appartenant à des groupes très différents, il est toutefois accepté de considérer les cyanobactéries comme des « [microalgues procaryotes](#) ». Par conséquent, par souci de simplification, nous utiliserons ici le terme de microalgues en considérant qu'il englobe les cyanobactéries.

Aérobie

Un organisme aérobie utilise l'oxygène (O₂) pour son métabolisme. Au contraire, un organisme [anaérobie](#) n'a pas besoin de dioxygène pour fonctionner.

Algue bleue ou bleu-vert

Voir [cyanobactérie](#).

Anaérobie

Voir [aérobie](#).

Anoxie (voir [fiche A2](#))

En biologie, l'anoxie décrit une souffrance cellulaire induite par le manque de d'oxygène (O₂) présent dans le sang ou dans le milieu extérieur, ou l'impossibilité pour les cellules d'utiliser cet oxygène. En ce sens, des animaux peuvent mourir asphyxiés par anoxie « interne » alors que le taux d'oxygène de l'eau est normal, du fait par exemple de la présence de composés toxiques qui empêchent l'utilisation par les cellules de l'oxygène dissous dans le sang ou dans les fluides corporels.

En écologie aquatique, on parle d'anoxie lorsque la concentration en oxygène (O₂) dissous (*Dissolved Oxygen*, DO) n'est pas détectable dans le milieu. C'est une forme sévère d'[hypoxie](#). La présence ou l'absence d'O₂ dissous est un aspect important des écosystèmes aquatiques car il détermine quels types d'organismes peuvent vivre dans cet écosystème.

En océanographie, on parle « d'*anoxie des eaux* » dans le cas où la teneur en oxygène est trop faible pour permettre la vie aquatique, même si la concentration en oxygène dissous dans le milieu n'a pas atteint 0 mg/L. « L'*anoxie des fonds* » caractérise une situation d'anoxie sévère à l'interface entre l'eau et les sédiments.

Un milieu *oxique* est au contraire bien oxygéné.

Autotrophe, autotrophie

Organisme capable de synthétiser de la matière organique en utilisant le dioxyde de carbone (CO_2) de l'air, ou les ions carbonates (CO_3^{2-}) et monohydrogénocarbonates (HCO_3^-) dans l'eau, comme sources de carbone.

NB : Pour la majorité des organismes [autotrophes](#), cette synthèse se fait grâce à la [photosynthèse](#) (énergie lumineuse), on peut alors être plus précis en parlant d'organismes photo-autotrophes. Par simplification, concernant le [phytoplancton](#), nous utilisons le terme « autotrophe ».

B

Biofilm

Communauté de micro-organismes (bactéries, champignons, microalgues, protozoaires) formant une ou plusieurs couches adhérentes à un substrat, d'aspect visqueux, en général en milieu aquatique.

Biovolume phytoplanctonique (ou microalgal)

L'expression de l'abondance du [phytoplancton](#), exprimée en nombre de cellules par millilitre en eaux douces ou par litre en eaux marines, n'est pas entièrement satisfaisante car il existe de très importantes variations de taille entre les espèces, ou entre les individus d'une même espèce. Il est donc préférable d'évaluer le biovolume plutôt que le nombre de cellules. A partir des dimensions cellulaires des différents taxons et donc de leur volume cellulaire moyen, on peut estimer le biovolume total de chaque espèce dans un échantillon. Exprimé en unité de volume (μm^3 ou mm^3) par litre d'eau, le *biovolume* permet de rendre compte de la contribution à la biomasse microalgale totale d'espèces peu nombreuses mais de grande taille et au contraire d'espèces de petite taille mais présentes en grand nombre. Le biovolume est aussi utilisé pour convertir la biomasse en unités de carbone, utilisées dans l'étude des flux de matière organique dans les communautés aquatiques, ou en d'autres types d'unités (ex. unités d'azote).

NB : La [chlorophylle-a](#) est aussi considérée comme un indicateur de la biomasse végétale. Elle présente l'avantage de pouvoir être dosée rapidement mais la quantité de chlorophylle-a est très variable d'une espèce à l'autre.

Bloom

Anglicisme, correspondant au terme d' « [efflorescence](#) ».

C

Chaine alimentaire

Enchaînement d'organismes de différents niveaux trophiques (producteurs, consommateurs et décomposeurs). L'ensemble des chaînes trophiques au sein d'un écosystème forme un « [réseau trophique](#) ».

Chlorophylle-a

La chlorophylle-a (*chl-a*) est le [pigment](#) photosynthétique le plus commun du règne végétal et la forme majoritaire de la chlorophylle. Ce pigment est présent chez tous les organismes effectuant la photosynthèse. La mesure de sa concentration dans l'eau est utilisée comme indicateur de la biomasse de [phytoplancton](#) ([indice trophique](#)), et donc de la [production primaire](#) et présente l'avantage d'être dosée rapidement. Les concentrations en chlorophylle-a dans l'eau sont habituellement exprimées en $\mu\text{g/L}$ ou mg/m^3 .

Colonie

Groupe de cellules jointes entre elles de façon plus ou moins permanente, ou enveloppées dans un même mucilage ou gaine.

Cyanobactérie (voir [fiches C](#))

Les cyanobactéries sont des bactéries particulières puisqu'elles sont capables d'effectuer la [photosynthèse](#). A cet égard, elles sont similaires aux plantes supérieures et aux [algues eucaryotes](#). Le terme «cyano- », dérivé du grec, découle de la présence de [pigments photosynthétiques](#) qui confèrent un aspect bleuté aux cyanobactéries. Le terme [algue bleue](#) ou bleu-vert est d'ailleurs utilisé dans le langage courant. Cependant, il est suggéré d'adopter de préférence la terminologie de « *cyanobactérie* » afin de clairement mettre en évidence le fait que ces organismes appartiennent au règne des bactéries. De taille comprise entre 0.5 et 60 µm, les cyanobactéries sont présentes dans tous les milieux, qu'ils soient aquatiques ou terrestres.

Cyanotoxines

Les cyanotoxines sont les [phycotoxines](#) produites par les [cyanobactéries](#). Ce sont principalement des alcaloïdes et des peptides cycliques de faible poids moléculaire. Leurs noms sont pour la plupart dérivés du nom des espèces qui les produisent. Certaines cyanotoxines (ex. ; saxitoxines et lipopolysaccharides) ne sont pas exclusivement produites par les cyanobactéries, tandis que d'autres, telles que les très étudiées *microcystines* et *anatoxines*, ne sont pas connues pour d'autres organismes. Une même toxine peut être produite par différents genres et espèces de cyanobactéries. On classe les cyanotoxines en fonction de leur mode d'action, tels que dermatotoxines, hépatotoxines et neurotoxines.

D

Diatomées

[Microalgues eucaryotes](#) unicellulaires, solitaires ou coloniales, non motiles (ne peut se mouvoir), de couleur brune ou jaune et de taille comprise entre 2 µm et 1 mm. Caractérisées par un squelette externe siliceux nommé *frustule*, nécessitant par conséquent une disponibilité de silice dans l'eau (la silice est un [facteur limitant](#) du développement des diatomées). Présentes dans tous les milieux aquatiques.

Dinoflagellés

[Microalgues eucaryotes](#) unicellulaires de couleur rouge-orangé et de taille comprise entre 3 et 50 µm. Leurs deux flagelles leur permettent d'effectuer des déplacements tournoyants (du grec « *dino* » : toupie) et des migrations verticales. Présents dans tous les milieux aquatiques.

Dominance

Une [microalgue](#) est dite dominante lorsqu'elle est capable de croître activement et d'évincer les autres espèces en formant la majeure partie de la biomasse du [phytoplancton](#).

Dystrophie

En océanographie, le terme « *dystrophie* » est utilisé pour caractériser les situations de déséquilibre entre les [nutriments](#) majeurs (azote, phosphore et silice). Ce terme rejoint la notion de « *déséquilibre entre les rapports stoechiométriques* » utilisée dans le domaine des eaux douces.

E

Eaux colorées

Terme utilisé dans le contexte des [eaux littorales](#), le phénomène d'eaux colorées correspond à une prolifération phytoplanctonique dense ([efflorescence](#)) se manifestant par des nappes de couleurs rouges, vertes ou brunes dues aux [pigments](#) des [microalgues](#).

Les eaux colorées peuvent être toxiques (exemple des eaux rouges à *Alexandrium minutum*) ou non. Les eaux marines vertes sont dues à la prolifération de *Lepidodinium chlorophorum*, [microalgue](#) ne produisant pas de toxines connues à ce jour.

Eaux côtières

Désigne l'eau située en deçà d'une ligne dont tout point est situé à une distance d'un mille marin au-delà du point le plus proche de la ligne de base servant pour la mesure de la largeur des eaux territoriales et qui s'étendent, dans le cas des cours d'eau, jusqu'à la limite extérieure d'une [eau de transition](#).

Eaux de transition

Eaux de surface situées à proximité des embouchures de rivières ou de fleuves, qui sont partiellement salines en raison de leur proximité des eaux côtières mais qui restent fondamentalement influencées par des courants d'eau douce.

Eaux littorales

Ce sont les [eaux de transition](#) et [les eaux côtières](#).

Ecume

Ce terme, traduit littéralement de l'anglais "scum", fait référence à une accumulation dense de microalgues à la surface de l'eau. Le terme écume est utilisé dans le sens où de grandes nappes mousseuses et colorées peuvent être observées, le plus souvent sur les rives ou rivages. Ce phénomène est souvent la conséquence de deux mécanismes successifs : l'accumulation de cellules à la surface de la colonne d'eau lorsque les conditions sont calmes, puis une accumulation de ces cellules au niveau des rives par l'intermédiaire de l'action du vent et de conditions environnementales particulières. Ainsi, l'absence d'écume ne traduit pas une absence de prolifération.

*NB : Les écumes blanches produites en milieu marin sont souvent la conséquence d'une prolifération de [microalgues](#) du genre *Phaeocystis*. L'épais mucilage constitué de polysaccharides qui englobe les colonies de *Phaeocystis* gonfle au contact de l'eau, donnant alors une substance visqueuse semblable à la gélatine.*

Efflorescence

Le terme « efflorescence » reste ambigu et les experts ne s'accordent pas sur une définition claire. Cependant, ce terme désigne en général le résultat d'une phase de prolifération massive de [microalgues](#), se traduisant par une production importante de biomasse, généralement sur une courte période de temps. En effet, un taux de croissance élevé est révélateur d'un déséquilibre de l'écosystème. Ce phénomène concerne les eaux douces, saumâtres ou marines. On fixe généralement le seuil de l'efflorescence algale à 10 000 cellules par millilitre en eaux douces et à 100 000 à 250 000 cellules par litre en eaux marines ; dans certains cas, la concentration atteint plusieurs millions de cellules par millilitre ou litre. Ce phénomène est le plus souvent lié à un enrichissement du milieu par des apports de nutriments liés aux activités humaines ([eutrophisation](#)). Mots similaires : [bloom algal](#), poussée planctonique, [fleur d'eau](#), floraison algale.

Estuaire

Embouchure d'un fleuve en milieu marin qui est soumise à l'action des marées.

Etat trophique

Niveau de productivité d'un écosystème aquatique. La détermination de l'état trophique d'un écosystème est utile car elle permet de déterminer l'ampleur du processus d'[eutrophisation](#). Les termes « [oligotrophe](#) », « [mésotrophe](#) » et « [eutrophe](#) » correspondent aux écosystèmes recevant respectivement *peu*, *moyennement* et *beaucoup* d'apports de nutriments. Le terme « *hypereutrophe* » est un terme utilisé pour les systèmes recevant des quantités excessives de [nutriments](#). Différentes classifications existent, basées sur des valeurs seuils d'[indice trophiques](#).

Eucaryote

Organisme unicellulaire ou pluricellulaire, dont les cellules contiennent un noyau délimité par une membrane et d'autres organites délimités par une membrane tel que les mitochondries et les chloroplastes (s'oppose en cela aux [procaryotes](#) tels que les bactéries). Les animaux, les champignons et les plantes sont des organismes eucaryotes.

Eutrophisation

Enrichissement de l'eau en éléments nutritifs, qui a pour conséquence la production d'une forte biomasse végétale entraînant une perturbation de l'équilibre entre les organismes présents dans l'eau et une dégradation de la qualité de l'eau. Initialement, ce terme était utilisé pour les lacs et les réservoirs, mais il est aujourd'hui aussi appliqué aux rivières, [estuaires](#) et aux [eaux côtières](#). On dit qu'un écosystème est « eutrophisé » lorsqu'il est l'objet d'un dysfonctionnement manifeste ([hypoxies](#), proliférations de phytoplancton et/ou de macroalgues, mortalité de poissons...).

Eutrophe

Voir [état trophique](#).

F

Facteur limitant (ou facteur causal)

En biologie, un facteur limitant est un facteur physique ou nutritif qui limite naturellement la croissance, l'abondance et/ou la distribution d'un organisme ou d'une population d'organismes dans un écosystème. Ce concept est basé sur la « *loi du Minimum de Liebig* » qui statue que la croissance n'est pas contrôlée par la quantité totale de ressources disponibles, mais par la ressource la plus rare, indépendamment de l'abondance des autres. Ce terme est plus particulièrement associé aux [nutriments](#) : celui qui est limitant dans un écosystème est celui dont le ratio apport/demande est le plus bas.

Facteur de contrôle

En écologie, ce terme fait référence aux variables de l'environnement qui modulent naturellement la croissance, l'abondance et/ou la distribution d'un organisme ou d'une population d'organismes dans un écosystème. Ces facteurs sont physico-chimiques (température, salinité, concentration en [nutriments](#), lumière...) ou biologiques (compétition, prédation...).

Facteur de maîtrise (ou facteur opérationnel de contrôle)

Un facteur de maîtrise est un [facteur de contrôle](#) sur lequel les gestionnaires peuvent agir pour contrôler la prolifération d'un végétal aquatique. Le plus souvent c'est le [facteur limitant](#) qui est utilisé (ex. azote pour les proliférations d'ulves, phosphore pour les proliférations de cyanobactéries).

Fleur d'eau

Terme surtout utilisé au Québec. Une fleur d'eau correspond à une densité importante de [cyanobactéries](#) telle que le phénomène est généralement visible à l'œil nu. Le Ministère du Développement Durable de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques du Québec a établi qu'une fleur d'eau correspond à une densité égale ou supérieure à 20 000 cellules de cyanobactéries par ml.

G

H

HAB

Sigle pour « *Harmful algal bloom* », traduction d'efflorescence *nocive*. On parle d'efflorescence « *nocive* » lorsque ce phénomène entraîne des conséquences néfastes pour l'écosystème et la santé publique. Par conséquent, HAB ne désigne pas seulement les efflorescences produisant des toxines mais toutes celles créant des nuisances. Par exemple, *Noctiluca scintillans*, espèce marine, ne produit pas de [phycotoxine](#) connue à ce jour mais peut dégager de l'ammoniac en quantité « néfaste » lorsqu'il y a prolifération de cette espèce.

Hétérotrophe, hétérotrophie

Se dit d'un être vivant utilisant des molécules organiques provenant de son environnement comme source de carbone, soit en absorbant des particules par endocytose soit en absorbant des composés sous forme soluble. L'hétérotrophie est le contraire de l'[autotrophie](#).

u contraire de la plupart des [microalgues](#), l'espèce *Noctiluca scintillans*, responsable des eaux colorées rouges souvent observées sur la côte sud de la Bretagne, est une espèce hétérotrophe puisqu'elle se nourrit de la matière organique produite en grande quantité lors des blooms primaires de diatomées.

Hypoxie (voir [fiche A2](#))

L'hypoxie caractérise une situation d'appauvrissement de la teneur en oxygène en solution dans l'eau. L'hypoxie induit une souffrance des organismes aquatiques et peut les conduire à adopter des stratégies d'évitement (remontée en surface pour respirer, fuite vers des eaux plus riches en oxygène). Si la teneur en oxygène dissous continue de baisser, l'hypoxie peut être suivie par une phase d'[anoxie](#).

-----I-----

Indice trophique

Un indice trophique est une variable utilisée pour déterminer l'[état trophique](#) d'un écosystème aquatique. Dans les classifications les plus courantes, les variables servant d'indices sont le phosphore total (mg/L), l'azote total (mg/L), la [chlorophylle-a](#) (µg/L) et la transparence mesurée au disque de Secchi (m).

-----J-----

-----K-----

-----L-----

Limnologie

Discipline d'étude se focalisant sur les écosystèmes d'eaux continentales (lacs, rivières, marais, etc...).

-----M-----

Macroalgues

Désigne essentiellement les algues pluricellulaires visibles à l'œil nu, au contraire des [microalgues](#). Les ulves, les laminaires ou les fucus sont des macroalgues.

Macrophytes

Ce terme englobe tous les végétaux aquatiques visibles à l'œil nu, c'est-à-dire les plantes supérieures (immergées et émergentes) et les [macroalgues](#).

Mésotrophe

Voir [état trophique](#).

Microalgue

Désigne les [algues](#) de taille microscopique, c'est dire de 0.2 µm (ex. picocyanobactéries) à 1 mm de diamètre (certaines [diatomées](#) marines).

Mixotrophie, mixotrophe

Capacité d'un organisme à utiliser différentes stratégies de nutrition, combinant notamment l'[autotrophie](#) et l'[hétérotrophie](#), c'est-à-dire capable d'utiliser aussi bien des sources de matière organique préexistante (hétérotrophe) que de produire elle-même cette matière organique par photosynthèse à partir de [nutriments](#) minéraux (autotrophie).

-----N-----

Nutriment

Élément essentiel pour la croissance, la survie et la reproduction d'un organisme donné. On distingue les macronutriments (Carbone, Hydrogène, Azote, Oxygène, Phosphore, Soufre, Calcium et Silice) et les micronutriments (Manganèse, Fer,...). On utilise aussi dans le langage courant l'expression « *sels nutritifs* » pour les macronutriments, même si cette appellation a un caractère un peu désuet.

-----O-----

Oligotrophe

Voir [état trophique](#).

-----P-----

Pélagique

Se dit d'un organisme vivant au sein de la colonne d'eau des écosystèmes aquatiques.

Photosynthèse

Utilisation de l'énergie lumineuse pour synthétiser de la matière organique à partir de nutriments minéraux. La photosynthèse conduit à la consommation de dioxyde de carbone (CO₂) et à la production d'oxygène gazeux (O₂). Cette réaction est réalisée grâce aux [pigments](#) photorécepteurs, tels que la [chlorophylle-a](#).

Photosynthétique (organisme)

Se dit d'un organisme capable d'effectuer la photosynthèse (ensemble des végétaux dont les algues et les cyanobactéries).

Phototrophie (par opposition à chimiotrophie)

Capacité d'un organisme à utiliser la lumière (photons) comme source d'énergie pour synthétiser la matière organique.

Phytobenthos

Fait référence aux organismes photosynthétiques vivant sur le fond des écosystèmes marins, saumâtres et d'eau douce ou attachés à un substrat. Ce terme inclut les plantes vasculaires, les [macroalgues](#) et les [microalgues](#) fixées ([périphyton](#)).

Phytoflagellés

[Microalgues](#) caractérisées par l'existence de flagelles ou fouets vibratiles qui servent à la nage. Comprennent notamment les Chlorophycées (Volvocales), Euglénophycées, Cryptophycées et [Dinoflagellés](#).

Phytoplancton

Ensemble des microorganismes photosynthétiques ([microalgues](#)) en suspension dans la colonne d'eau des écosystèmes marins, saumâtres et d'eau douce.

Phycocyanine

[Pigment photosynthétique](#) de la famille des phycobilines. Majoritaire chez les [cyanobactéries](#) et de longueur d'onde d'absorbance maximale de 620 nm reflétant dans le bleu. D' où le terme « algues bleues » fréquemment utilisé dans le langage courant pour les cyanobactéries.

Phycotoxines

Désigne l'ensemble des toxines produites par certaines espèces de [microalgues](#) marines et d'eau douce. En eau douce, les problèmes causés par les phycotoxines sont souvent le résultat des proliférations de cyanobactéries produisant des [cyanotoxines](#), principalement des hépatotoxines (ex. microcystine), neurotoxines (ex. anatoxines) et dermatotoxines (ex. lyngbiatoxines). En eau marine, les principales phycotoxines sont diarrhéiques (ex. DSP produite par *Dinophysis* sp.), paralysantes (ex. PSP produite par *Alexandrium* sp.) et amnésiantes (ex. ASP produite par *Pseudonitzschia* sp.).

Picophytoplancton

[Phytoplancton](#) de taille comprise entre 0.2 et 2.0 µm de diamètre.

Pigment photosynthétique

Pigment permettant d'effectuer la photosynthèse. Chez les [algues](#), il existe trois familles de pigments : les chlorophylles (dont la [chlorophylle-a](#)), les caroténoïdes et les phycobilines (voir [phycocyanine](#)). Par ailleurs, certains pigments caroténoïdes (β-carotène, myxoxanthophylle, échinénone, oscilloxanthine et canthaxanthine) sont très efficaces pour la protection vis-à-vis de la photo-oxydation par les ultraviolets (UV) et les radiations solaires trop intenses.

Procaryote

Organisme unicellulaire solitaire ou colonial, dont les cellules ne présentent pas de noyau délimité par une membrane et autres organites délimités par une membrane. Le domaine des procaryotes regroupe les règnes des archées et des bactéries.

Production primaire

Quantité de carbone fixée par [photosynthèse](#) pour synthétiser de la matière organique, dans une période de temps (ex ; $\text{mg C/m}^3/\text{h}$). Les « *producteurs primaires* » sont tous les organismes photosynthétiques.

-----Q-----

-----R-----

Réseau trophique

Ensemble de [chaînes alimentaires](#) d'un même écosystème. Les relations de nutrition existant entre les différents maillons du réseau permettent de faire circuler l'énergie, c'est-à-dire les éléments nécessaires à la croissance des organismes tels que les [nutriments](#).

-----S-----

Stratification

Division de la colonne d'eau en plusieurs couches de densités différentes causée par des variations de température ou de salinité, ou éventuellement les deux à la fois.

Succession phytoplanctonique

Remplacement continu d'espèces et/ou de groupes phytoplanctoniques à travers les saisons en fonction de leur physiologie et des conditions environnementales. Les variations physiques, chimiques et les changements biologiques contrôlent ce remplacement d'espèces. Par exemple ; après un épuisement de la silice en solution dans l'eau de mer, consécutif à un bloom primaire de [diatomées](#), il peut se produire un bloom secondaire de [dinoflagellés](#) tels que *Lepidodinium chlorophorum*. En effet, les dinoflagellés n'ont pas besoin de silice et vont tirer profit de l'azote et du phosphore encore disponibles.

-----T-----

Taux de saturation

Terme utilisé au sujet de l'oxygène. Le taux de saturation (%) correspond au pourcentage d'oxygène dissous qu'une eau contient par rapport à sa [teneur à saturation](#) théorique (voir [fiche A1](#)).

Taxonomie

Discipline traitant de la description et du regroupement des êtres vivants en entités appelées taxons.

Teneur à saturation

Terme utilisé au sujet de l'oxygène. La teneur à saturation est la concentration maximale d'oxygène dissous qu'une eau peut contenir. Elle est fonction des conditions de température, de salinité et de pression (voir [fiche A1](#)).

-----U-----

-----V-----

-----W-----

-----X-----

-----Y-----

Zone morte

Terme utilisé en océanographie. Se dit des zones d'[hypoxie](#) sévère ou d'[anoxie](#) avec une quasi disparition des organismes aquatiques. Un secteur du Golfe du Mexique et un secteur de la Mer Baltique sont souvent cités comme exemple de zones mortes.

Zooplankton

Ensemble d'organismes du plancton appartenant au règne des animaux. Le zooplankton, regroupe des organismes unicellulaires ou pluricellulaires [hétérotrophes](#) qui, comme tous les animaux, consomment de la matière organique préexistante, vivante ou non. Ce groupe inclut des représentants des protozoaires, les rotifères, les crustacés et certains insectes.