

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة 8 ماي 1945 قالمة

Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la terre et de l'Univers



## Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

**Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie**

**Filière : Sciences Biologiques**

**Spécialité/ Microbiologie Appliquée**

**Département: ECOLOGIE ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT**

---

**Thème :**

**Le phytoplancton des eaux douces :  
Synthèse bibliographique et méthodes d'études**

---

**Présenté par : Mme. KHEDAIRIA Amina**

**Devant le jury composé de :**

<b>Président:</b>	<b>Mr. ROUIBI Abdelhakim</b>	<b>MCB</b>	<b>Université de Guelma</b>
<b>Examineur:</b>	<b>Mr. ZEBSA Rabah</b>	<b>MAB</b>	<b>Université de Guelma</b>
<b>Encadreur:</b>	<b>Mr. ROUABHIA Kamel</b>	<b>MAA</b>	<b>Université de Guelma</b>

**Année universitaire 2019/2020**

## *Remerciements*

**J**e tiens remercier en premier lieu Dieu le tout puissant de m'avoir guidé durant toutes ces années et m'a permis de réaliser ce travail en me donnant la force, la patience et la volonté.

Nous remercions les membres du jury qui ont bien voulu consacrer une partie de leur temps à notre mémoire :

Nous exprimons nos plus vifs remerciements à **Mr. ROUIBI Abdelhakim**, maître de conférences au département de biologie à l'université de Guelma 8 Mai 1945, pour nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Nous tenons à remercier aussi **Mr. ZEBBA RABAH** maître de Conférences à l'université de Guelma d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous vifs remerciement vont à notre encadreur **Mr. ROUABHIA Kamel**, maître-assistant à l'université de Guelma, de m'avoir encadré et suivi mon travail de près avec sa rigueur scientifique, ses conseil ainsi que sa gentillesse qui m'ont permis de réaliser au mieux ce modeste travail. On la remercie aussi pour les conseils judicieux qu'elle nous a donnés et tout particulièrement pour les grands efforts qu'elle a déployés.

Nous remercions, du fond du cœur, nos parents pour leur soutien et leur patience durant nos études et pour leur aide et encouragement

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

## *Dédicace*

*Je dédie ce Modeste travail à :*

*A celle qui a veillé à mon chevet et à mon bien être et m'a entouré de tout son amour et son affection, l'être le plus cher au monde et à mon cœur ma mère "BEDRAOUI Samia "*

*A mon père "KHEDAIRIA Ahmed", que Dieu le protège et le garde pour m'avoir orienté et appris à être une femme respectable et responsable.*

*A mes frères "Rida" et "Wassim"*

*A mes sœurs "Khawla" et "Sara"*

*A mon chef "HOUAOUSSA Zouheyr"*

*Ainsi tous les enseignants qui ont participé ma  
Formation.*

*A tous ceux qui ; par un mot, m'ont donné la force de continuer ....*

***AMINA***

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

	Page
<b>Introduction.....</b>	<b>01</b>
 <i>Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le phytoplancton des eaux douces</i> 	
1. Généralités sur le phytoplancton .....	03
2. Clés d'identification du phytoplancton .....	04
2.1. Cas des phytoplanctons eucaryotes .....	04
2.2. Cas des Cyanobactéries .....	04
3. Écophysiologie du phytoplancton .....	05
4. Facteurs de croissance de phytoplancton .....	06
5. La place du phytoplancton dans le réseau trophique .....	07
6. Composantes du phytoplancton en eau douce .....	08
6.1. Les Chlorophytes .....	09
6.2. Les Chromophytes .....	11
6.2.1. Les Bacillariophycées ou Diatomées.....	11
6.2.2. Les Chrysophycées .....	11
6.2.3. Les Xanthophycées .....	12
6.3. Les Euglénophytes .....	13
6.4. Les Cyanophytes .....	14
6.4.1. Caractéristique généraux .....	14
6.4.2. Caractéristiques uniques des cyanobactéries .....	16
6.4.2.1. Pigments photosynthétiques .....	16
6.4.2.2. Migrations verticale et horizontale .....	17
6.4.2.3. Dormance .....	18
6.4.2.4. Multiplication .....	18
6.4.2.5. Les cyanobactéries, des organismes primitifs très compétitifs .....	18
7. Habitat et écologie .....	20

8. Influence des facteurs environnementaux sur les cycles biologiques .....	22
9. Le phytoplancton comme indicateur de pollution .....	23
10. Impacts des facteurs naturels sur la dynamique planctonique .....	24
10.1. Facteurs d'origine abiotique .....	24
10.1.1. La température .....	24
10.1.2. Le climat .....	24
10.1.3. Le potentiel d'Hydrogène (pH) .....	25
10.1.4. La salinité .....	25
10.1.5. L'oxygène dissous .....	25
10.1.6. Les nutriments .....	25
10.1.7. L'Azote ammoniacal .....	26
10.1.8. Les nitrites (NO <sub>2</sub> ) .....	26
10.1.9. Les nitrates (NO <sub>3</sub> ) .....	27
10.1.10. Le phosphore .....	27
10.1.11. La concentration en chlorophylle « a ».....	27
10.2. Facteurs d'origine biotique .....	28
11. Rôle du phytoplancton dans l'écosystème aquatique .....	28
11.1. Dans la photosynthèse .....	28
11.2. Dans la chaîne alimentaire .....	29
11.3. Dans le traitement des eaux usées .....	29
11.4. Autres rôles du phytoplancton .....	29
12. Effets bénéfiques de la prolifération des cyanobactéries .....	30
13. Effets indésirables de la prolifération des cyanobactéries .....	30
13.1. Prolifération des cyanobactéries .....	31
13.2. Cyanotoxines .....	31
14. Effets nuisibles du phytoplancton .....	33
14.1. Risque sur la santé humaine .....	33
14.2. Risque sur l'environnement et le cadre de vie .....	33
14.3. Risque sur les organismes vivant .....	33
15. Applications des microalgues .....	33
15.1. Applications alimentaires .....	33
15.2. Applications pharmaceutiques .....	34
15.3. Applications cosmétiques .....	34
15.4. Agrofournitures et traitement de l'eau .....	34

## Chapitre II : Méthodes d'étude du phytoplancton des eaux douces

1.	Stratégie d'échantillonnage .....	36
1.1.	Méthode de prélèvement .....	36
1.2.	Matériel de prélèvement du phytoplancton .....	36
1.3.	Transport et conservation .....	36
2.	Analyse des paramètres physico-chimiques .....	37
2.1.	Matériel de mesure des paramètres physico-chimiques .....	37
2.2.	La température .....	37
2.3.	Le potentiel hydrogène .....	38
2.4.	Conductivité électrique .....	38
2.5.	L'oxygène dissous .....	39
2.6.	La salinité .....	39
3.	Analyses des paramètres phytoplanctoniques du phytoplancton .....	39
3.1.	Fixation et stockage des échantillons .....	39
3.1.1.	Solutions de fixation des échantillons .....	40
3.2.	La microscopie .....	40
3.3.	Analyse qualitative .....	40
3.3.1.	Identification des espèces .....	40
3.3.2.	Diversité globale .....	41
3.3.2.1.	Méthodes univariées .....	41
3.3.2.2.	Méthodes multivariées .....	42
3.4.	Analyse quantitative .....	42
3.4.1.	Comptages des espèces .....	42
	<b>Conclusion</b> .....	45
	<b>Références bibliographiques</b> .....	47

### Résumé

### Abstract

### الملخص

## Liste des figures

<b>Figure N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
01	Schéma résumant les grands compartiments et les grandes voies de transfert au sein du réseau trophique pélagique	08
02	Photo de quelques espèces des Chlorophytes	10
03	Photo de quelques espèces des Diatomées	11
04	Photo d'une espèce des Chrysophycées	12
05	Photo de quelques espèces des Cyanobactéries	19

## Liste des tableaux

<b>Tableau N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
01	Correspondance entre la classification du Chlorophyta de Bourelly et la classification Natura 2000	10
02	Correspondance entre la classification du Chromophyta de Bourelly et la classification Natura 2000	13
03	Correspondance entre la classification du Euglénophyta de Bourelly et la classification Natura 2000	14
04	Correspondance entre la classification du Cyanophyta de Bourelly et la classification Natura 2000	14
05	Comparaison des composants de principales classes	19
06	Correspondance entre la classification du Pyrrhophyta de Bourelly et la classification Natura 2000	20

## **Liste des abréviations**

**BMAA** : Beta-méthylamino-L-alanine

**CCME** : Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement

**DCE**: Directive Cadre de l'Eau

**WHO**: World Health Organization

## Introduction

L'eau est un élément vital et indispensable à la vie. Elle couvre 70% de la planète. Son importance pour l'économie ne cesse de croître. Sa demande et son approvisionnement deviennent de plus en plus difficiles à acquérir. Elle est nécessaire à la santé, l'agriculture, l'industrie, le tourisme, les loisirs et la navigation (**Anonyme, 2009**).

Le plancton végétal est le premier maillon biologique des chaînes alimentaires dans les écosystèmes aquatiques, la production primaire est principalement assurée par ce maillon. Ces organismes photosynthétiques utilisent l'énergie lumineuse pénétrant dans l'eau pour effectuer la photosynthèse. Leur croissance dépend de la disponibilité en nutriments et de la présence de toxiques, de la température et de la lumière. Dans certaines conditions, avec des apports élevés de nutriments, la croissance excessive de ce phytoplancton conduit à une situation d'eutrophisation. Ce dernier est la conséquence d'un apport excessif en phosphore, généralement lié aux activités urbaines, agricoles et industrielles (**Satha, 2015**).

Le phytoplancton est composé de l'ensemble du plancton végétal, c'est-à-dire des microorganismes photosynthétiques (**Jeffrey et al., 1997**) dérivant dans les masses d'eaux. Il s'agit de cellules, colonies ou filaments dont les mouvements dépendent essentiellement de ceux de l'environnement aquatique et/ou qui sont mobiles mais dont les déplacements sont relativement restreints dans la masse d'eau.

Le phytoplancton constitue la base des chaînes alimentaires des écosystèmes aquatiques ; les micro-organismes constituant le phytoplancton sont dotés de performances et de plasticité leur permettant de coloniser tout type de milieu tel que : les eaux douces, les océans, les sebkhas et les salines. (**Masmoudi, 2014**).

En tant que principal producteur primaire, le phytoplancton est à la base des écosystèmes aquatiques et est capable de réagir rapidement aux perturbations du milieu (i.e. apports en nutriments, changements de température, salinité, turbidité, turbulence ou stratification), qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropogénique (**Smayda, 1998**). Les changements quantitatifs et qualitatifs qui ont lieu au sein des communautés phytoplanctoniques ont un impact sur l'ensemble de la chaîne trophique (**Stockner et Antia, 1986, Thyssen, 2008**). C'est pourquoi ce compartiment a été choisi comme bio-indicateur potentiel de la qualité des masses d'eau. Il est donc important de pouvoir suivre et évaluer sa composition, son abondance et sa biomasse ainsi que sa variabilité spatio-temporelle, mais ceci reste une tâche délicate.

L'objectif du présent travail constituer une étude bibliographique sur le phytoplancton des eaux douces. Afin de mieux prédire et surtout prévenir les risques associés à la prolifération des phytoplancton , Les aspects traités incluent l'écologie des phytoplancton, les facteurs favorisant leur prolifération, les gestionnaires de l'eau doivent connaître les méthodes les plus efficaces pour dénombrement et l' identification des phytoplancton en eaux douce .

Ce travail en manuscrit en deux chapitres

- Le premier chapitre ; études bibliographiques et généralités sur le phytoplancton d'eau douce et leur prolifération et multiple applications.
- Le deuxième chapitre, une étude expérimentale consacrée aux présentations du matériel et méthodologie suivie pour l'étude et la réalisation des analyses physicochimiques et phytoplanctoniques.

## Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le phytoplancton des eaux douces

### 1. Généralités sur le phytoplancton

L'existence du plancton a été ignorée pendant fort longtemps, bien que dès l'antiquité, l'océan fut déjà considéré par des philosophes tels que Thalès de Milet qui était déjà perçue chez les pêcheurs au Moyen Age, chez lesquels existait l'adage : Milet comme la source de toute essence organique. L'importance du plancton «Che i pesci crede, Che si plancton» qui signifie «qui dit poissons dit plancton» (**Trégouboff et Rose, 1957**).

Les premières études du microplancton ont débutées au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, et ne se sont développées qu'à partir de 1845 à la suite de l'invention du filet pélagique par Müller, permettant d'effectuer de vraies pêches planctoniques (**Trégouboff et Rose, 1957**). Dès lors, l'immense diversité du plancton a suscité un intérêt croissant, et les scientifiques n'ont cessés que de décrire cette fascinante variété. Les grandes expéditions maritimes telles que celle de Darwin ;en 1835 à bord du Beagle, ou bien les fameuses campagnes du Challenger (1872-1876) ont permis d'acquérir les premières collections d'organismes planctoniques, dont les principaux étaient des Radiolaires et des Diatomées, leurs squelettes siliceux permettant de les décrire plus facilement. «Il y a peu d'objets plus admirables que les délicates enveloppes siliceuses des Diatomées» (**Charles D., 1859**). La première étape de la planctologie avait ainsi pour objectif la reconnaissance et la description morphologique du plancton, mais très rapidement, les scientifiques ont constatés la variabilité géographique de la distribution du plancton, dont l'existence et l'abondance se trouvent en rapport étroit avec les caractéristiques du milieu ambiant. Le rôle de ces micro-organismes dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques est aussi apparu fondamental, et a fait l'objet de nombreuses études. Le phytoplancton (du grec phyton ou plante et planktos ou errant) est constitué par l'ensemble du plancton végétal, c'est-à-dire des microorganismes photosynthétiques qui sont libres, passifs et en suspension dans la colonne d'eau (**Rolland, 2009**), capables d'élaborer par photosynthèse leur propre substance organique, à partir de l'énergie solaire, de l'eau, du dioxyde de carbone et des sels nutritifs. Il s'agit de cellules, colonies ou filaments :

- (a) qui ne peuvent pas nager et dont les mouvements dépendent de ceux de l'environnement aquatique,
- (b) et/ou qui sont motiles (flagellés ou ciliés) mais dont les déplacements sont restreints.

Ces micro-organismes sont qualifiés de thallophytes, c'est à dire dépourvus de tiges des racines et de vaisseaux conducteurs. Leurs formes sont extrêmement variées, la diversité morphologique étant souvent liée à une adaptation à la mobilité (flottaison et mouvements verticaux) (**Zeitzschel, 1978**). Le phytoplancton se situe le plus souvent dans la couche supérieure éclairée des masses d'eau, dite zone euphotique dont la limite inférieure correspond à la profondeur recevant 1% de la lumière incidente.

Si les organismes phytoplanctoniques représentent seulement 1% de la biomasse des organismes photosynthétiques sur terre, ils assurent 45% de la production primaire (**Chisholm, 1995; Behrenfeld et al., 2001**). Ils sont ainsi à la base de la chaîne trophique pélagique (**Azam et Malfatti, 2007**) et sont donc responsables d'une part essentielle de la production primaire dans les milieux aquatiques.

## 2. Clés d'identification du phytoplancton

Selon qu'il s'agit d'algues vraies ou de Cyanobactéries, les clés Permettant l'identification du phytoplancton peuvent être résumées comme suit :

### 2.1. Cas des phytoplanctons eucaryotes

Dans la systématique des algues vraies, les critères de classification proposée par (**Bourrelly, 1985**) sont :

- La nature chimique des chlorophylles, des autres pigments et des réserves.
- La cytologie du noyau et de l'appareil flagellaire.
- Les caractères cytologiques.
- Le mode de reproduction et la complexité structurale.
- Les caractères morphologiques.

### 2.2. Cas des Cyanobactéries

Dans la systématique des Cyanobactéries, les caractères morphologiques représentent les clés essentielles d'identification, dont les critères proposés par (**Bourrelly, 1985**) sont :

- La structure de la micro-algue « cellulaire ou filamenteuse ».
- La forme de la colonie ou du trichome.
- La taille des cellules.
- La gaine gélatineuse « couleur et aspect ».
- La présence ou non, de structures cellulaires caractéristiques « akinètes, hétérocystes et vacuoles gazeuses ».

### 3. Écophysiologie du phytoplancton

En supposant la lumière, la température et l'hydrodynamisme favorables à la croissance du phytoplancton, la biodisponibilité des nutriments présents dans l'eau (contrôle ascendant) et l'intensité de la prédation (contrôle descendant) commandent le développement des espèces phytoplanctoniques. La demande exercée par les organismes est fonction de la composition de leurs tissus vivants (**Hutchinson, 1957**).

L'une des sources de carbone est sous forme de gaz carbonique d'origine atmosphérique qui se dissout facilement dans les écosystèmes aquatiques par diffusion (**Hutchinson, 1957**). Il est généralement admis que le carbone est excédentaire environ d'un coefficient 30, et donc rarement limitant (**Schindler et al., 1971; Schindler, 1974 ; Moss, 1980 ; Welch, 1980**).

Toutefois, dans les milieux Hyper-eutrophes, l'augmentation du pH entraîne une diminution de la solubilité des bicarbonates dans l'eau pouvant créer une limitation décroissance du phytoplancton (**Sevrine-reyssac et al., 1996**). Par contre, l'azote peut être le facteur limitant du développement du phytoplancton (**Dufour et Berland, 1999**). Les sources sont généralement minérales : nitrate, ammonium ou même le nitrite. Les deux premières sont susceptibles de provoquer les mêmes vitesses de croissance, tandis que les nitrites ont rapidement un effet toxique à faibles concentrations (**Pourriot et Meybeck, 1995**).

En terme moléculaire, d'après les calculs de **Redfield (1934)**, la composition intracellulaire des algues en culture se traduit par des concentrations en azote (N) environ 16 fois plus élevées qu'en phosphore (P). Les résultats d'expériences faites par **Chiandani et Vighi (1974)** confirment ces travaux et montrent que les demandes algales en N et P peuvent varier entre des rapports compris entre 17 : 1 et 13 : 1. Cependant, les modifications de la production au cours d'expérience de fertilisation par divers éléments sous des formulations diverses, ont montré qu'un apport en azote exerçait peu ou pas d'effet alors que même une petite quantité de phosphore pouvait stimuler la production d'une façon considérable (**Paloheimo et Zimmerman, 1983**). Les apports en carbone et en oligoélément sont également un effet limité (**Goldman, 1960 ; Schindler et al., 1971; Schindler et Fee, 1974 ; Robarts et Southall, 1977**). Le phosphore peut être fortement adsorbé par des espèces phytoplanctoniques dont certaines sont prédisposées à la sédimentation et donc à terme être éliminées de la colonne d'eau (**Welch, 1980 ; Sonzogni et al., 1982**).

#### 4. Facteurs de croissance de phytoplancton

Malgré une taille réduite, le phytoplancton influence directement et indirectement sur le climat de la terre. Suite à leurs décompositions, le phytoplancton participe au processus de formation de la pompe biologique du carbone. La croissance de phytoplancton nécessite des sels minéraux (nitrate, phosphore, silicate, potassium), des oligo-éléments (magnésium, fer) et de carbone atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ), ainsi que certaines conditions du milieu (**Kafi, 2017**) :

- Température et niveau des précipitations
- Turbidité (degré d'opacité) de l'eau
- Taux d'ensoleillement,
- Degré de la pollution

Dans un cycle annuel, le phytoplancton a une grande variabilité saisonnière, leur développement est enregistré au printemps et à l'automne, lorsque les conditions sont optimales. Actuellement, ce rythme annuel est interrompu en raison de l'évolution du milieu récepteur par l'excès d'apports en nutriments et le réchauffement climatique. La photosynthèse est un processus qui nécessite chez le phytoplancton deux comportements interdépendants : le pompage du carbone minéral ou atmosphérique ( $\text{CO}_2$ ) nécessaire au cycle de Calvin et la colonisation de la couche superficielle des océans qui varie sous l'effet d'un apport de chaleur ou de sel, ou d'une modification de l'intensité des vents (**Cadier, 2016**).

Comme toutes les plantes vertes, le phytoplancton produit l'énergie grâce à la photosynthèse, un processus qui utilise l'énergie du soleil pour produire des carbohydrates. Le phytoplancton marin possède un avantage majeur par rapport à la végétation terrestre, les conditions de leurs milieux empêchent le développement des structures de soutiens rigides (tels les troncs et les branches des arbres) (**Yon, 2004**). Leur biomasse totale ne représente donc que 1% de la biomasse végétale terrestre. En revanche, ils consomment l'équivalent en  $\text{CO}_2$  durant le phénomène de photosynthèse et contribue ainsi à régénérer l'oxygène ( $\text{O}_2$ ). La concentration de la chlorophylle *a*, principale pigment de la photosynthèse permet de déduire l'abondance de la communauté de phytoplancton au niveau des océans à partir des observations satellitaires. La photosynthèse étant très liée à:

- L'intensité du rayonnement solaire arrivant à la surface de l'océan.
- La profondeur à laquelle se localise le phytoplancton (**Kafi, 2017**).

De plus, les conséquences éco physiologiques associées à la richesse spécifique des populations phytoplanctoniques sont nombreuses. Les différentes espèces ne réagissent pas de la même manière aux facteurs du milieu. Leurs taux de croissance est variable selon les stratégies adaptives, telles que:

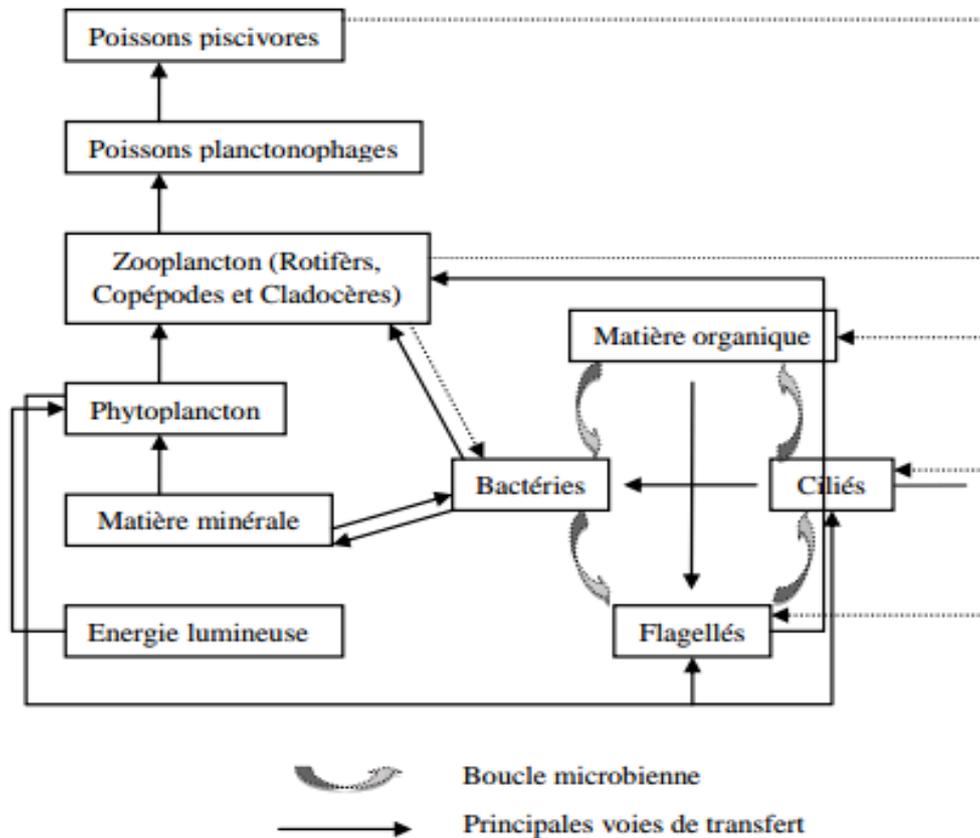
- Mécanismes favorisent leur mobilité vers des zones riches en nutriments et en lumière (photo-taxisme, migration verticale, agrégation),
- Mode de nutrition mixotrophe,
- Compétition interspécifique par production de substances,
- Mécanismes de défense contre la prédation (**Rossi, 2008**).

### **5. La place du phytoplancton dans le réseau trophique**

Les organismes phytoplanctoniques sont à la base des chaînes trophiques pélagiques et donc responsables d'une part essentielle de la production primaire dans les milieux aquatiques (Fig. 1). Lorsque certaines conditions sont favorables (températures élevées associées à des conditions météorologiques calmes, niveaux élevés d'éléments nutritifs d'origine anthropique ou naturelle), certaines espèces peuvent proliférer de manière significative (**Reynolds, 1988**). Selon **McQueen et al., (1986)**, la structure de toute communauté aquatique est sous le contrôle de différents facteurs qui interagissent simultanément entre eux :

- Les facteurs ascendants (« bottom-up » en anglais) qui se définissent en particulier par la dynamique des ressources nutritives (apports endogènes et exogènes) et qui vont déterminer le type de peuplement algal.
- Les facteurs descendants (« top-down » en anglais) qui sont définis en particulier par la pression de prédation exercée par les herbivores et qui vont en retour modifier la structure du réseau trophique. Ainsi les organismes photosynthétiques se sont broutés par du zooplancton herbivore, lui-même consommé par du zooplancton de plus grande taille, ou par des poissons brouteurs. Dans tous les cas, les poissons carnivores représentent le niveau trophique supérieur des écosystèmes aquatiques. Chaque étape génère des débris de matière organique particulaire et dissoute dont les bactéries assurent la minéralisation en bouclant ainsi le système. Au sein du phytoplancton, la stabilisation de la colonne d'eau (relation avec le vent, le courant...) provoque un remplacement des espèces non motiles comme les diatomées présentes au cours des périodes de brassage et de crue, par des espèces flagellées (comme les Dinophycées et Chrysophycées) et certains Cyanophycées (**Jones et Poplawski, 1998**). Ces dernières se déplacent dans la colonne

d'eau pour optimiser leur activité photosynthétique en fonction de l'éclairement et des concentrations en sels nutritifs, ce qui justifie la mention d'écostratégie de Chorus et Bartram en 1999.



**Figure 1** : Schéma résumant les grands compartiments et les grandes voies de transfert au sein du réseau trophique pélagique (...).

En utilisant la combinaison de paramètres multiples tels que la température, l'intensité lumineuse, les besoins en nutriments, la vitesse de croissance, le déplacement dans la colonne d'eau et /ou la pression de broutage, **Reynolds et al., (1998 et 2002)** ont défini des groupes ou assemblages pour l'ensemble des espèces phytoplanctoniques dans le but de caractériser puis de comparer des états trophiques entre eux. Ces associations peuvent aussi être déterminantes lors de modifications écologiques perturbant l'écosystème (**Kruk et al., 2002**). Un total de 31 groupes fonctionnels est actuellement identifié avec des propriétés écologiques définies et remis en question périodiquement par les différents chercheurs suivant l'écosystème étudié.

## 6. Composantes du phytoplancton en eau douce

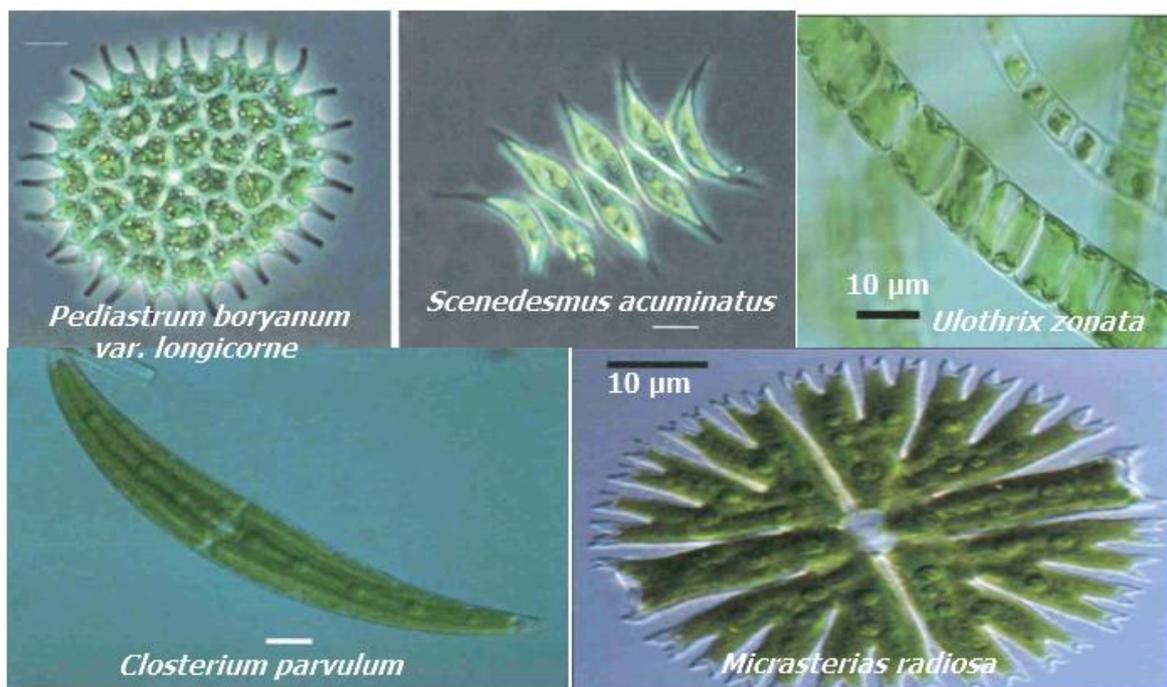
Le phytoplancton regroupe deux types d'organismes qui diffèrent au niveau cytologique par la présence ou non d'un noyau cellulaire (ADN confiné dans une enveloppe

nucléaire) (**Prescott et al., 2003**). Les individus qui sont munis d'un noyau sont classés sous le nom d'eucaryotes ou algues vraies et ceux qui sont dépourvus de ce dernier sont les procaryotes ou Cyanobactéries. A l'heure actuelle, la phylogénie est en pleine évolution, grâce notamment aux avancées technologiques en biologie moléculaire (**Iglesias-Rodriguez et al., 2006 ; Not et al., 2007 ; Saez et al., 2008**). A ce jour quatre phylum avec huit principales classes différenciées selon des critères morphologiques, cytologiques, biochimiques et reproductifs sont recensés dans les milieux aquatiques.

### 6.1. Les Chlorophytes

Ils forment un groupe extrêmement vaste et morphologiquement très diversifié. Elles sont réparties en 4 classes : les Euchlorophycées, les Ulothricophycées, les Zygothricées et les Charophycées. Celles-ci comportent environ 500 genres, représentant plus de 15000 espèces (**John, 1994**). Toutefois, la plupart des algues vertes planctoniques lacustres appartiennent à l'ordre des Volvocales et à celui des Chlorococcales qui font partie de la classe des Euchlorophycées (**Bourrelly, 1972**). Les cellules des Volvocales possèdent une paroi cellulaire glycoprotéique pourvue de 2, 4 ou 8 flagelles de même taille, un noyau et deux vacuoles contractiles localisées à la base des flagelles. Les chloroplastes de la plupart des volvocales sont en forme de U et les chlorophylles a et b sont les pigments majeurs (**Ettl, 1983**). Les Chlorococcales sont unicellulaires ou coloniales avec une membrane bien définie, parfois de formes filamenteuses (**Ettl et Gärtner, 1988**). L'état végétatif est sous forme immobile et les flagelles sont absents au stade adulte (Fig. 2). On distingue comme précédemment un noyau par cellule et les mêmes pigments majeurs. Pour assurer leur reproduction, les Volvocales et les Chlorococcales forment des zoospores à l'intérieur de la paroi cellulaire de la cellule mère. On distingue 3 types de zoospores : celles avec membrane et deux fouets égaux, celles sans membrane et à fouets égaux et celles sans membrane et à fouets légèrement inégaux mais de même structure (**Bourrelly, 1972**).

Dans les formes coloniales, chaque cellule de la colonie se divise par division végétative en n cellules formant 2xn cellules filles. On retrouve également trois types de reproductions sexuées : isogamie (2 gamètes de même taille), anisogamie (gamète male plus petit que gamète femelle) et oogamie (gamète femelle non flagellé et gamète mâle flagellé) (**Nozaki, 2003**). Globalement les Chlorophytes sont des microorganismes typiquement thermophiles, photophiles et ont une préférence pour les milieux riches en nutriments azotés (**Sane, 2006**).



**Figure 02 :** Photo de quelques espèces des Chlorophytes (Druart et Balvay, 2007; l'éérable, 2009).

**Tableau 01 :** Correspondance entre la classification du Chlorophyta de Bourrelly et la classification Natura 2000 (Asconit, 2015).

Classification de Bourrelly			Classification Natura 2000			
Embranchement	Classe	Ordre	Embranchement	Classe	Ordre	
CHLOROPHYTA	Euchlorophycées	Volvocales	CHLOROPHYTA	Chlorophyceae	Volvocales	
		Tétraspores			Tétraspores	
		Chlorococcales			Chlorococcales	
		Chaetophorales				
		Oedogoniales				
		Sphaeropleales				
		Microsporales				
		Chaetopeltidales				
		Ulothricales				
	Ulothricophycées	Ulothricales		Ulvophyceae	Ulvales	
		Ulvales			Ulvales	
		Chaetophorales			Cladophorales	
		Oedogoniales				
		Trentépothiales			Trebouxiophyceae	Chlorellales
		Sphaeropleales				
Siphonocladales		Prasinophyceae	Chlorodendrales			
Siphonales		Pyramimonadales				
Dichotomosiphonales						
Zygophycées	Zygnématales	Zygnematophyceae	Zygnematales			
Charophycées	Charales	Charophyceae	Charales			
		Klebsormidiophyceae	Klebsormidiales			

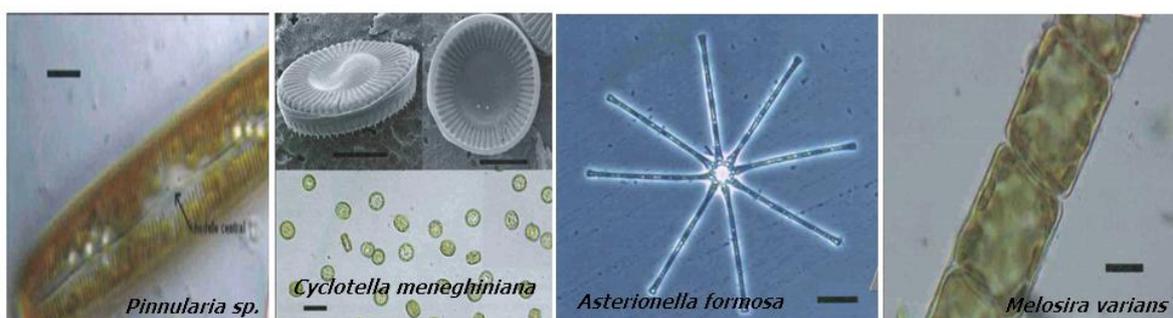
## 6.2. Les Chromophytes

Ils contiennent la chlorophylle «a» et «c». Leurs réserves sont constituées de chrysolaminarine ou de laminarine selon le cas, toujours dans le cytoplasme. Trois principales classes composent ce phylum :

### 6.2.1. Les Bacillariophycées ou Diatomées

Engloberaient plus de  $10^5$  espèces et on estime que seulement près de 15000 ont été identifiées à ce jour. C'est un des groupes les plus importants du phytoplancton même si beaucoup d'espèces sont sessiles ou associées aux substrats littoraux. Leur caractéristique principale est la présence d'une paroi cellulaire siliceuse appelée frustule (**Germain, 1981**). Le pourtour des valves est connecté avec des bandes qui constituent la ceinture de la cellule. Ces microorganismes sont unicellulaires ou coloniaux et sont communément divisés en deux groupes : les diatomées centriques qui ont une symétrie radiale et les diatomées pennées qui ont une symétrie bilatérale.

Les valves des diatomées pennées présentent des parties de cellules plus épaisses et dilatées (Fig.03). Chez certaines espèces, une fente, nommée raphé, traverse une partie ou la cellule entière alors que chez d'autres espèces, on observe une dépression de la paroi cellulaire appelée pseudoraphé. Quatre groupes de diatomées pennées sont différenciés sur la base de ces structures : les Araphidées, les Raphidoidées, les Monoraphidées et les Biraphidées. La reproduction végétative par division cellulaire est le mode le plus commun de multiplication (**Canter-Lund et Lund, 1995**).

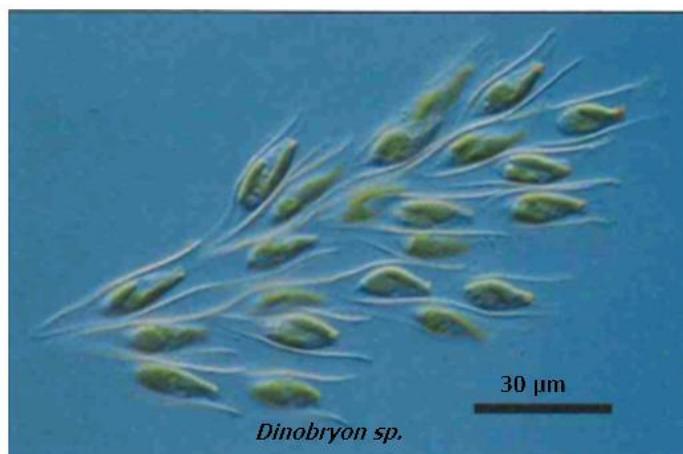


**Figure 03 :** Photo de quelques espèces des Diatomées (**Druart et Balvay, 2007; l'étable, 2009**).

### 6.2.2. Les Chrysophycées

Organismes essentiellement unicellulaires de couleur dorée, d'où leur nom (de khruos, or en grec). Ce sont des algues unicellulaires ou coloniales (rarement

filamenteuses) (Fig.04), dont certaines vivent dans une enveloppe protectrice appelée lorique. Leurs cellules possèdent un ou plusieurs plastes jaunes ou bruns à cause de la forte concentration en xanthophylles (lutéine, fucoxanthine, diadinoxanthine) et caroténoïdes ( $\beta$ -carotène) masquant la couleur due aux chlorophylles « a » (Wetzel, 2001). La plupart de ces cellules obtiennent leurs énergies par mixotrophie, c'est à dire qu'elles sont capables d'autotrophie et d'hétérotrophie. Dans le dernier cas, elles se nourrissent en consommant de la matière particulaire comme des bactéries ou des protistes (phagotrophie) ou bien en absorbant des molécules organiques complexes (osmotrophie) (Sanders et al., 1990 ; Domaizon et al., 2003). Le nombre de flagelles est variable. La plupart des cellules sont uniflagellées mais d'autres possèdent deux flagelles généralement de même taille. Beaucoup d'espèces appartenant à cette classe n'ont pas de paroi cellulaire mais sont juste entourées d'une membrane cytoplasmique. D'autres possèdent une surface cellulaire couverte de plaques ou d'écailles siliceuses ou calcaires. La multiplication se fait par fission binaire ou par zoosporulation. Les phénomènes sexuels, rarement signalés, sont de nature isogamique. En période de repos, la formation endogène de kystes siliceux, globuleux, percés d'un pore obstrué par un bouchon, est caractéristique des Chrysophycées. Ces microorganismes sont en majorité dulçaquicoles libres ou fixés (De Reviere, 2003).



**Figure 04 :** Photo d'une espèce des Chrysophycées (l'érable, 2008).

### 6.2.3. Les Xanthophycées

Regroupent plus de 100 genres et environ 600 espèces dulçaquicoles. Elles vivent à l'état unicellulaire, colonial ou de filament et sont caractérisées par une plus grande proportion de pigments caroténoïdes ( $\beta$ -carotène) que de chlorophylle, ce qui peut expliquer leur couleur jaune-verte (Ettl, 1978). Les cellules mobiles possèdent deux flagelles de taille différente. La paroi cellulaire est souvent absente et quand elle est

présente, elle contient une grande quantité de pectine et peut être siliceuse chez plusieurs espèces. Les xanthophycées se divisent essentiellement par fission binaire mais peuvent également former des zoospores. La reproduction sexuée, quand elle a lieu, est le plus souvent isogame (Ott et Oldham-Ott, 2003).

**Tableau 02 :** Correspondance entre la classification du Chromophyta de Bourrelly et la classification Natura 2000 (Asconit, 2015).

Classification de Bourrelly			Classification Natura 2000			
Embranchement	Classe	Ordre	Embranchement	Classe	Ordre	
CHROMOPHYTA	Chrysophycées	Chromulinales	HETEROKONTOPHYTA	Chrysophyceae	Chromulinales	
		Chrysosaccales			Chrysosaccales	
					Hibberdiales	
					Hydrurales	
		Isochrysidales			Isochrysidales	
		Monosigales			Monosigales	
		Ochromonadales				
		....			...	
	Xanthophycées	Tribonématales		Tribonematales		
		Mischococcales		Mischococcales		
		Chloramoebales				
		Rhizochloridales				
		Vauchérialiales				
		Hétérogloecales				
	Phaeophycées	Ectocarpales		Phaeophycées	Ectocarpales	
		Sphacélariales				
					Eustigmatophyceae	Eustigmatales
						Vaucherialiales
					Bodonophyceae	Bodonales
					Phaeothamniophyceae	Phaeothamniales
			Synurophyceae	Synurales		

### 6.3. Les Euglénophytes

Les Euglénophytes ou Eugléniens, du grec Euglenos c.à.d. aux belles prunelles sont des algues unicellulaires flagellées rarement coloniales. Elles contiennent de la chlorophylle « a » et « b » et leurs réserves glucidiques sont constituées par le paramylon stocké dans le cytoplasme. Des gouttelettes lipidiques constituent des réserves supplémentaires. La classe des Euglénophycées est unique pour ce phylum, elle se réparties en 13 genres et plus de 2000 espèces. Ils sont presque tous unicellulaires, sans paroi cellulaire, possèdent un, deux ou trois flagelles qui émanent d'une invagination de la membrane cellulaire, une vacuole contractile et un stigma orange à rouge composé de globules de caroténoïdes (Rosowski, 2003). Bien que certaines euglènes soient non pigmentées, phagotrophes (capable d'ingérer des particules solides) et par conséquent considérés comme des protistes animaux (ex. protozoaires), la plupart sont photosynthétiques et parfois hétérotrophes. Ce sont des micro-

organismes surtout dulçaquicoles (en particulier dans des milieux riches en matière organique). La multiplication s'effectue par division cellulaire (**De Reviere, 2003**).

Ces algues unicellulaires se déplacent à l'aide de deux flagelles de taille inégale, étranges organismes que ces euglènes dont certaines sont capables de vivre comme des cellules animales dans l'obscurité et comme des cellules végétales à la lumière (chlorophylle a et b et caroténoïdes) : Elles passent donc du statut d'hétérotrophes à celui d'autotrophes!

**Tableau 03** : Correspondance entre la classification du Euglénophyta de Bourrelly et la classification Natura 2000 (**Asconit, 2015**).

Classification de Bourrelly			Classification Natura 2000		
Embranchement	Classe	Ordre	Embranchement	Classe	Ordre
EUGLENOPHYTA	Euglénophycées	Euglénales	EUGLENOPHYTA	Euglenophyceae	Euglenales
					Eutreptiales

## 6.4. Les Cyanophytes

### 6.4.1. Caractéristique généraux

Les cyanobactéries (couramment appelées cyanophycées ou algues bleues) du phytoplancton lacustre sont les organismes qui forment les fleurs d'eau les plus nuisances (**Feuillade, 1992**).

Les Cyanophytes se distinguent des autres phylums car ils regroupent les micro-organismes procaryotes. Cet embranchement est composé de la classe des Cyanophycées et regroupent plus de 110 genres et environ 1000 espèces dulçaquicoles. La plupart des Cyanophycées sphériques appartiennent à la famille des Chroococcaceae et les filamenteuses aux familles des Nostocaceae et Oscillatoriaceae (**Bourrelly, 1985**). Les cellules appartenant à cette classe se caractérisent par l'absence de noyau, de plaste et de reproduction sexuée.

**Tableau 04** : Correspondance entre la classification du Cyanophyta de Bourrelly et la classification Natura 2000 (**Asconit, 2015**).

Classification de Bourrelly			Classification Natura 2000		
Embranchement	Classe	Ordre	Embranchement	Classe	Ordre
CYANOPHYTA	Cyanophycées	Nostocales	CYANOBACTERIA	Cyanophyceae	Nostocales
		Chroococcales			Chroococcales
		...			Oscillatoriales

Les Cyanophycées (ou algues bleues) se distinguent des procaryotes hétérotrophes par la présence de chlorophylle «a» et de pigments accessoires (phycocyanine, phycoérythrine, caroténoïdes) (Ganf et al., 1991; Schagerl et Donabaum, 2003 ; Colyer et al., 2005). Certaines espèces possèdent des vacuoles gazeuses qui leur permettent de réguler leur position dans la colonne d'eau et de se maintenir à une profondeur où la température, la lumière et les éléments nutritifs sont favorables à leur développement. Un bon exemple de cette propriété physiologique est fourni avec l'espèce *Planktothrix rubescens* (Schanz et al., 1997 ; Bright et Walsby 1999 ; Walsby et al., 2004 ; Walsby, 2005). D'autres Cyanophycées, également filamenteuses comme la précédente, possèdent deux types de cellules particulières : des hétérocystes et des akinètes. C'est par exemple le cas des genres *Anabaena* et *Nostoc* (Fogg et al., 1973; Mur et al., 1999). Les hétérocystes sont des cellules à membrane épaisse, à contenu cellulaire homogène et très clair, capables de fixer l'azote atmosphérique.

Ces organismes sont donc avantagés en milieu limitant en azote assimilable. Les akinètes sont des spores durables et chargées de réserves qui, une fois détachées en conditions favorables, forment un nouveau filament (Bourrelly, 1985).

Les Cyanophycées se divisent essentiellement par fission binaire ou division végétative, c'est à dire que la membrane cellulaire s'invagine et sépare la cellule mère en deux cellules filles isomorphiques. Généralement, cette division a lieu dans un, deux ou trois plans qui sont plus ou moins perpendiculaires les uns aux autres entre générations successives (Komárek, 2003). La diversité de ce phylum a été moins étudiée en milieu marin que dans les milieux d'eau douce. Cette différence résulte de l'occurrence de fortes efflorescences de Cyanophytes en milieu d'eau douce et du fait que les espèces marines sont constituées de deux principaux genres unicellulaires de petite taille (*Synechococcus* et *Prochlorococcus*) plus difficilement étudiables. *Prochlorococcus*, découverte en 1988 (Chisholm et al., 1988), est le genre photosynthétique le plus abondant de la biosphère (Partensky et al., 1999). Elle contribue jusqu'à 84% de la fixation du CO<sub>2</sub> dans certaines eaux oligotrophes (Groga, 2012).

Ces micro-organismes sont dépourvus de flagelles et leur appareil végétatif peut être unicellulaire, colonial ou filamenteux. Les cellules renferment de la chlorophylle «a» et des phycobiliprotéines. Les réserves sont constituées par le glycogène, la cyanophycine et des gouttelettes lipidiques. La multiplication s'effectue principalement par division

cellulaire et par fragmentation chez les filamenteux (**De Reviere, 2003**). Certaines espèces ont développé des moyens de défense contre le zooplancton, comme leurs associations en colonies ou leurs formes en filaments (**Lampert, 1987 ; Bouvy et al., 2001**).

Généralement, les Cyanophycées ont une préférence pour l'azote sous forme d'ammonium (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) alors que le nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) est la forme préférentielle des cellules eucaryotes du phytoplancton (**Blomqvist et al., 1994**).

*Microcystis aeruginosa* est une espèce de cyanobactéries d'eau douce qui peut former des proliférations d'algues nuisibles d'importance économique et écologique (**Oberholster, 2004**). Le genre *Microcystis* se caractérise par de petites cellules organisées en colonies (dont les grandes colonies peuvent être vues à l'œil nu). Le protoplaste est de couleur bleu-vert clair, apparaissant sombre ou marron en raison des effets optiques des vésicules remplies de gaz ; cela peut être utile comme caractéristique distinctive. Ces vésicules fournissent la flottabilité nécessaire pour que l'espèce *Microcystis aeruginosa* qui reste à un niveau dans la colonne d'eau à laquelle ils peuvent obtenir des niveaux optimaux de lumière et de dioxyde de carbone pour une croissance rapide (**Satoshi et al., 2000**).

*Oscillatoria limosa* est une espèce de cyanobactérie filamenteuse dont le trichome est libre, solitaire et dépourvue de gaine. Le mouvement et le déplacement hélicoïdal de l'apex sont caractéristiques de ce genre. Cette espèce produit une microcystine, c'est la cyanotoxine la plus fréquemment rencontrées en milieu naturel (**Chorus et Bartram, 1999**), elle a été détectées partout dans le monde, et dans les plans d'eau aux caractéristiques physico-chimiques variables (**Scheffer et al., 1997**).

#### 6.4.2. Caractéristiques uniques des cyanobactéries

- **Pigments photosynthétiques**

Les cyanobactéries utilisent un ensemble de stratégies qui leur a permis décoloniser tous les écosystèmes d'eau douce. D'abord, elles présentent une pigmentation diversifiée qui assure une efficacité photosynthétique élevée et une capacité à soutenir la production photosynthétique nette à une faible intensité lumineuse. Ce sont les phycobiliprotéines qui confèrent cet avantage aux cyanobactéries, comparativement à la plupart des algues, en leur permettant d'exploiter le rayonnement solaire disponible (PAR, *photosynthetically available radiation* ou lumière visible, 400-700 (nm) sur une plus grande étendue de longueurs d'ondes.

Une caractéristique importante des cyanobactéries est leur capacité à modifier la composition des pigments-protéines dans leurs complexes photosynthétiques (*light harvesting complexes*), ce qui leur donne une couleur différente selon les longueurs d'ondes auxquelles elles croissent (**Grossman et al., 2001**). La forme des cellules et la taille des colonies peuvent également influencer l'absorption de la lumière par les différentes espèces de cyanobactéries (**Vincent, 1989**).

- **Migrations verticale et horizontale**

En condition relativement calme, plusieurs espèces de cyanobactéries peuvent migrer verticalement dans la colonne d'eau grâce à leurs vacuoles gazeuses (structure présente chez plusieurs espèces). Elles peuvent ainsi profiter de la lumière en surface durant le jour, et migrer en profondeur dès la fin de la journée afin d'en exploiter les nutriments qui s'y trouvent souvent en plus grande concentration. En effet, l'absence d'oxygène (anoxie) à la surface des sédiments peut entraîner la remise en suspension du phosphore séquestré et le rendre disponible (**Nürnberg 1984 ; Carpenter et al., 1999**). Ainsi, les fleurs d'eau sont souvent observées le matin alors qu'elles disparaissent en après-midi (**Oliver et Ganf, 2000**). Cette caractéristique est importante à considérer dans l'élaboration d'un plan d'échantillonnage.

La taille de la colonie a une grande influence sur le potentiel de flottabilité des cyanobactéries. Selon la loi de Stokes, la vitesse de chute ou de flottaison d'une sphère dans un liquide est fonction de la viscosité du fluide, de l'accélération (gravité), de la densité des particules et de leur rayon. La vitesse de sédimentation (ou de flottaison) des cyanobactéries est donc grandement régulée par la taille de la colonie (rayon) et sa densité (importance des vacuoles gazeuses). La forme de la colonie influence également sa flottabilité. Par exemple, les colonies de *Microcystis aeruginosa* ayant un diamètre inférieur à 20 µm ont un pouvoir de migration très limité, alors que les colonies jusqu'à 1 600 µm de diamètre peuvent se transporter verticalement sur une distance de 10 m trois fois par jour (**Cronberg et Annadoter, 2006**).

En plus de la migration « active » sur le plan vertical, les cyanobactéries subissent également une migration « passive » horizontale due au vent ou aux mouvements des masses d'eau. Ce phénomène a été étudié par **Ishikawa et al., (2002)** dans un lac de très grande superficie (et source d'eau potable pour plusieurs grandes villes au Japon), où des fleurs d'eau de cyanobactéries (capables de migrer dans la colonne d'eau) ont été observées au centre du lac, là où les concentrations en nutriments étaient pourtant très faibles. Les auteurs suggèrent que les cyanobactéries se sont développées en zone littorale et ont ensuite

été transportées sur plusieurs kilomètres par advection (courants des masses d'eau entraînés par les vents). On comprend dès lors l'ampleur de la complexité spatiotemporelle liée à l'écologie de ces algues lorsqu'on cherche les facteurs qui causent les fleurs d'eau.

- **Dormance**

Lorsque les conditions du milieu ne sont plus favorables à leur prolifération, les Cyanobactéries ont la capacité d'entrer en dormance en attendant un environnement meilleur. Cet état de dormance est possible grâce à la formation des spores ou akinètes (cellules aux parois épaisses contenant des réserves) ou à une modification des cellules végétatives (Mur et al., 1999). Les akinètes peuvent ainsi survivre dans les sédiments durant l'hiver et même durant plusieurs années en consommant leurs réserves d'hydrates de carbone par respiration ou fermentation. Les cellules qui remontent vers la surface après la dormance sont unicellulaires ou en colonies de très petite taille.

- **Multiplication**

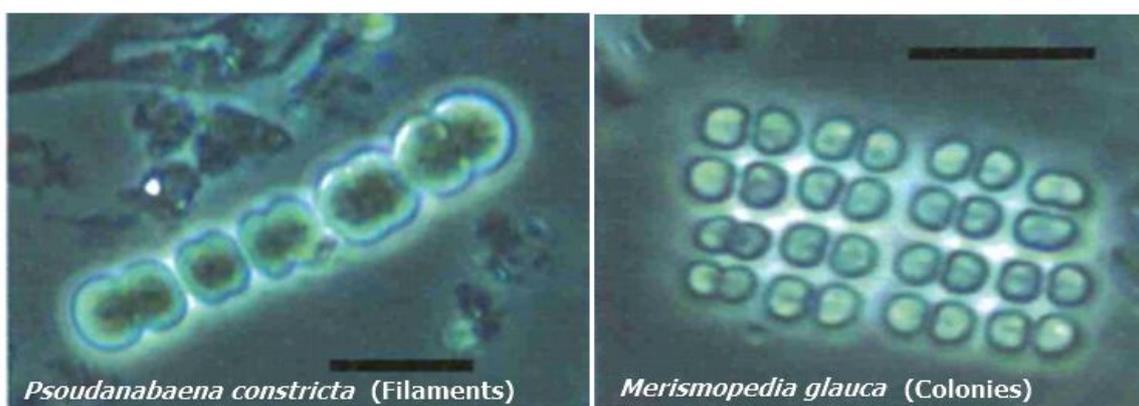
La multiplication des cyanobactéries est végétative (asexuée), les temps de doublement varient de quelques heures à plusieurs jours. Les genres unicellulaires peuvent produire des baeocytes (mini cellules) à l'intérieur de la cellule maternelle. Les individus coloniaux se multiplient également par fragmentation. Ainsi, les formes filamenteuses produisent des hormogènes (mini filaments mobiles) qui, après détachement du filament, participent à la colonisation.

- **Les cyanobactéries, des organismes primitifs très compétitifs**

Les cyanobactéries sont adaptées à une multitude de conditions environnementales et excellentes particulièrement sous conditions extrêmes. Il n'est donc pas surprenant qu'elles aient été parmi les premiers organismes à coloniser la Terre et qu'elles soient encore aujourd'hui très compétitives et parfois dominantes. Ce résumé des caractéristiques et adaptations des cyanobactéries n'est pas exhaustif mais présente une image générale de cet organisme primitif. Tous ces facteurs rendent les cyanobactéries très compétitives, surtout à la fin de l'été lorsque la stratification est fréquente et les nutriments en déficit dans l'épilimnion. Par contre, toutes les espèces de cyanobactéries ne possèdent pas ces aptitudes de façon égale et les stratégies d'adaptation au milieu sont variables selon les espèces et les conditions environnementales. De plus, puisque les cyanobactéries ont peu de prédateurs et puisqu'elles ont la capacité d'éviter la sédimentation par le biais de la flottaison, les taux de perte des cyanobactéries sont généralement faibles (Vincent, 1989). Leurs taux de croissance plus lents sont alors compensés par la forte prévalence des populations une fois

qu'elles sont établies (Mur et al., 1999), et par leur capacité à modifier l'environnement aquatique à leur avantage.

Les cyanobactéries vivent presque partout, y compris dans des conditions extrêmes, des glaces polaires aux sables des déserts, des geysers aux lacs très chauds et acides des cratères volcaniques. Les cellules sont de très petite taille (1 à quelques dizaines de micromètres) et forment souvent des colonies ou des filaments (fig. 05).



**Figure 05 :** Photo de quelques espèces des Cyanobactéries (Druart et balvay, 2007)

**Tableau 05 :** Comparaison des composants de principales classes

	Pigments: chlorophylles	Substance de réserve	Paroi cellulaire	Morphologie	Reproduction
Les Chlorophycées ou algues vertes	a et b; xanthophylles: luteine, violaxanthine.	amidon intraplastidial	principalement cellulose	unicellulaire, coloniale, filamenteuse, cénobiale, formes avec ou sans flagelles	asexuée (fission binaire) et sexuée (isogamie, anisogamie et oogamie)
Les Bacillariophycées ou diatomées	chlorophylles: a, c1, c2 et c3; xanthophylles: fucoxanthine, diatoxanthine, diadinoxanthine	chrysolaminarine, lipides	siliceuse ornementée (frustule)	Pennéc (symétrie bilatérale) ou Centrique (symétrie radiale)	asexuée (division cellulaire) et sexuée (oogamie chez les centriques, isogamie chez les pennées)
Les Cyanophycées ou cyanobactéries	chlorophylle a; phycobilines (phycocyanine, allophycocyanine, phycocrythrine)	glycogène, cyanophycine	peptidoglycane	unicellulaire, coloniale, filamenteuse	asexuée (fission binaire, fragmentation)
Les Dinophycées ou dinoflagellés	a et c2; xanthophylles: peridine, diadinoxanthine	amidon, lipides	si présente, constituée de cellulose	principalement unicellulaire, cellules nues ou renforcées par	asexuée (fission binaire, formation d'aplanospores)

Tableau 05 : (Suite)

				des plaques polygonales, avec 2 flagelles perpendiculaires	et sexuée (isogamie, anisogamie)
Les Cryptophycées (Tab. 06)	a et c2; phycobilines: phycocyanine, phycocrythrine	amidon extraplastidial	généralement absente	cellules nues, ovales et aplaties, avec 2 flagelles inégaux	principalement asexuée (fission binaire)
Les Chrysophycées ou algues dorées	chlorophylles: a, c1 et c2; xanthophylles: fucoxanthine, diatinoxanthine	chrysolaminarine, lipides	écailles de silice et cellulose	unicellulaire ou coloniale (rarement filamenteuse), cellules nues ou enveloppées par une structure protectrice (lorique), 1 ou 2 flagelles	asexuée (fission binaire, zoosporulation) et sexuée (isogamie)

**Tableau 06 :** Correspondance entre la classification du Pyrrhophyta de Bourrelly et la classification Natura 2000 (Asconit, 2015).

Classification de Bourrelly			Classification Natura 2000		
Embranchement	Classe	Ordre	Embranchement	Classe	Ordre
PYRRHOPHYTA	Cryptophycées	Cryptomonadales	CRYPTOPHYTA	Cryptophyceae	Cryptomonadales
		Tétragonidiales			Pyrenomonadales
	Dinophycées	Péridiniales	DINOPHYTA	Dinophyceae	Peridinales
		Dinococcales			Gymnodiniales
					Phytodiniales
					Lophodiniales

## 7. Habitat et écologie

Les organismes qui constituent le phytoplancton est d'une extrême plasticité écologique. Ces espèces très ubiquistes colonisent les biotopes terrestres et aquatiques (Fogg *et al.*, 1973), et se retrouvent dans l'eau douce, saumâtre ou salée. Quelques espèces sont recensées dans les eaux thermales tandis que d'autres tolèrent les basses températures des lacs arctiques et antarctiques (Skulberg, 1996). Certaines espèces vivent en association avec des animaux comme des protozoaires, des éponges ou des ascidies (endozoïques), ou avec des végétaux comme des fougères aquatiques ou des angiospermes (endophytiques) (Couté et Bernard, 2001). Elles peuvent encore vivre en symbiose avec des champignons et des algues vertes comme dans le cas des lichens. Au cas où elles sont strictement aquatiques, elles peuvent être planctoniques, vivant dans la colonne d'eau, ou benthiques,

fixées ou très proches des divers substrats (roches, coraux, algues, animaux) et se développent même à l'intérieur des sédiments (**Mur et al., 1999; Couté et Bernard, 2001**).

Le phytoplancton comporte des organismes autotrophes qui possèdent, suivant les espèces, en plus de leurs remarquables possibilités d'adaptation à la température, une excellente adaptabilité aux variations lumineuses grâce à une composition pigmentaire qui leur permet d'utiliser une large gamme du spectre lumineux. Certaines espèces peuvent aussi se déplacer dans la colonne d'eau grâce à des glissements, à des mouvements hélicoïdaux ou à la présence de vésicules à gaz. Ces éléments leur permettent d'aller se positionner au niveau de leur optimum lumineux dans la zone euphotique ou de descendre dans les couches inférieures chercher des concentrations plus importantes s en nutriments. D'autres peuvent s'affranchir partiellement des éléments nutritifs de part leurs capacités de stockage ou de transformation de l'azote atmosphérique.

Selon **Chorus et Bartram (1999)**, dans le phytoplancton il y a des organismes «écostratégiques» pouvant adopter plusieurs comportements qui les conduisent à dominer les communautés algales :

- « Ecostratégiques dispersés ou stratifiants ». C'est le cas des genres *Planktothrix* et *Limnothrix*. Ce sont des espèces filamenteuses sensibles aux fortes intensités lumineuses. La régulation de la flottabilité est moins efficace chez ces espèces qui se retrouvent alors dispersées dans l'épilimnion, arrivant parfois à éliminer les autres organismes phytoplanctoniques par simple ombrage. Cependant, ces espèces peuvent aussi adopter une stratégie différente en se développant au niveau de la thermocline où leur richesse en phycoérythrine leur permet d'absorber efficacement la lumière dans les longueurs d'ondes 490 à 570 nm (bleu et vert).

- « Ecostratégiques fixateurs d'azote ». Certaines espèces de Cyanophytes appartenant aux genres *Aphanizomenon*, *Nodularia*, et *Nostoc* peuvent profiter d'une limitation de la disponibilité en azote sous forme directement assimilable ( $\text{NO}_3$ -ou  $\text{NH}_4^+$ ) pour dominer les autres espèces grâce à leur fixation d'azote.

Dans les milieux aquatiques, la biomasse des Cyanophytes atteint parfois de telles proportions que l'eau se colore et il se forme une efflorescence ou «bloom» selon les Anglo-Saxons. Des couches parfois très épaisses et éventuellement des écumes apparaissent à la surface de l'eau avec une durée assez variable, de quelques heures à plusieurs mois. Ces

efflorescences sont le plus souvent dominées par une ou un petit nombre d'espèces, possédant pour la plupart d'entre elles des vésicules à gaz (**Reynolds, 1987**).

### 8. Influence des facteurs environnementaux sur les cycles biologiques

Le cycle saisonnier de la production phytoplanctonique est principalement contrôlé par la dynamique de mélange de la colonne d'eau (**Margalef, 1958, 1978**) : en effet, pour sa croissance et sa reproduction, le phytoplancton a besoin d'énergie lumineuse et de nutriments, d'où l'importance de la turbulence qui brasse la colonne d'eau et permet l'importation des nutriments dans la zone euphotique. Le bilan saisonnier de production de matière organique est extrêmement variable d'un écosystème pélagique à l'autre (**Longhurst, 1995**). A l'échelle de plans d'eau dans le monde, la structure des écosystèmes pélagiques forme un continuum depuis les régions présentant un cycle saisonnier marqué, incluant une période durant laquelle la zone euphotique se «recharge» en nutriments, jusqu'aux régions présentant un cycle hebdomadaire, avec un renouvellement épisodique des nutriments dans la zone euphotique, et où la productivité est largement conditionnée par le recyclage de ces éléments nutritifs dans la couche de mélange. Suivant la «démarche fonctionnelle», le phytoplancton est décrit par des variables d'état telles que «l'azote phytoplanctonique», par exemple ; cela permet d'établir la «carte annuelle» de la production primaire (**Hoch, 1998**) dans le cas de la Manche. Le regroupement des populations phytoplanctoniques agrégées en un seul «compartiment» décrit par sa biomasse chlorophyllienne (ou exprimée en azote) cède, depuis plusieurs années déjà, la place à une représentation plus «réaliste», qui distingue des entités fonctionnelles (classe de taille, phytoplancton siliceux, phytoplancton non siliceux) et identifie en particulier la «boucle microbienne» comme moteur du recyclage des éléments nutritifs.

La mesure de la croissance phytoplanctonique sur la base de la concentration en chlorophylle «a», en tant que réponse globale de la communauté phytoplanctonique à la variation des facteurs environnementaux, repose sur deux hypothèses :

a) les espèces constitutives de la communauté sont semblables au plan de leur physiologie,

b) les estimations des taux de croissance obtenues à l'aide de la mesure de la variation de la concentration en chlorophylle sont bien représentatives du «comportement moyen» des taxons dominants (**Smayda, 1997**). Ces hypothèses simplificatrices sont nécessaires à la modélisation des cycles biogéochimiques et à la quantification des flux de

matière et de nutriments dans l'écosystème. En revanche, elles sont trop réductrices pour aborder l'étude des cycles biologiques et de la dynamique de populations phytoplanctoniques précisément identifiées.

## 9. Le phytoplancton comme indicateur de pollution

Les eaux douces et particulièrement les eaux de surface, qui représentent une ressource vitale pour l'homme, sont menacées par des pollutions diverses, d'origine anthropique. Le phytoplancton réagit à ces altérations et peut être considéré comme un indicateur de la dégradation de la qualité des eaux continentales. La variété des taxons présents dans un prélèvement, leur assemblage, la présence ou l'absence de groupes sensibles (aux pollutions par exemple), donnent une indication sur la qualité des milieux. Ainsi, **Blandin (1986)** a donné au terme bio-indicateur la définition suivante «Un indicateur biologique (ou bio - Indicateur) est un organisme ou un ensemble d'organismes qui par référence à des variables biochimiques, cytologiques, physiologiques, éthologiques ou Écologiques permet, de façon pratique et sûre, de caractériser l'état d'un écosystème ou d'un éco complexe et de mettre en évidence aussi précocement que possible leurs modifications, naturelles ou provoquées».

A cet effet, **Reynolds et al., (2002)** ont publié une description détaillée de 31 assemblages Phytoplanctoniques qui peuvent être vus comme des groupes fonctionnels, c'est à dire des groupes d'espèces avec une sensibilité plus ou moins grande pour différentes combinaisons de propriétés physiques, chimiques et biologiques internes au lac (profondeur de la zone de mélange, lumière, température, P, N, Si, CO<sub>2</sub> et pression de prédation). Le phytoplancton, qui est donc fortement influencé par les changements environnementaux (**Padisak et al., 2006; Salsamo et al., 2006; Anneville et al., 2008**), est considéré comme étant la première communauté biologique à répondre à l'eutrophisation, spécialement dans les lacs (**Solheim, 2005**). Ainsi, ce compartiment biologique a été proposé puis imposé par la DCE (directive cadre de l'eau ; directive européenne du 23 décembre 2000) comme élément de qualité biologique pour les lacs et est identifié aujourd'hui comme un bio-indicateur potentiel puisque répondant aux changements trophiques des masses d'eau. Globalement, la prolifération du phytoplancton a un impact direct sur les écosystèmes aquatiques entraînant des modifications de la diversité et de la dynamique des populations.

En outre, certaines espèces, dont les Cyanobactéries, sont susceptibles de synthétiser des toxines à l'origine d'intoxications plus ou moins graves, représentant des

risques important pour la santé humaine et animale (**Chorus et Bartram, 1999**). Les usages de l'eau peuvent ainsi être limités par ces contaminations.

## **10. Impacts des facteurs naturels sur la dynamique planctonique**

### **10.1. Facteurs d'origine abiotique**

La croissance du phytoplancton est fortement influencée par les facteurs abiotiques (**Redfield, 1934**). Elles varient avec les saisons et dépendent de facteurs à la fois physique et chimiques. Les concentrations de nutriments constituent des indicateurs fondamentaux de prolifération phytoplanctonique (**Findley et Klingh, 1994**). Les études sur le contrôle des processus biologiques par le forçage physique sont fondamentales, pour mieux comprendre la variabilité temporelle et spatiale des communautés phytoplanctoniques. Le mélange, la température et les disponibilités en lumière et nutriments, fluctuent sur des échelles de temps différentes et peuvent influencer la dynamique du phytoplancton. Des modifications des communautés ont été observées sur des échelles de temps allant de quelques jours (**Sommer et al., 1986**) à quelques milliers d'années (**Finkel et al., 2004**).

#### **10.1.1. La température**

La température est l'un des plus importants paramètres physiques du milieu marin. En effet, elle influe, non seulement, sur le nombre des êtres vivants présents aux différentes profondeurs, mais aussi sur le climat des terres voisines et sur la densité de l'eau, dans ce cas, elle est à l'origine de certains courants (**Giacomini et al., 1984**). Elle joue un rôle essentiel et permet de définir les zones biogéographiques (**Collignon, 1991**). La température des océans est directement liée aux échanges thermiques entre les masses d'eaux océaniques et l'environnement (**Levitus, 2001 ; Levitus et al., 2005**). Ce facteur important du métabolisme, de la physiologie des organismes marins végétaux joue un rôle, non moins, important sur les variations de la viscosité du milieu, donc sur le mouvement des masses d'eau et le comportement du plancton ; il a un comportement saisonnier étroitement lié à celui du milieu environnant (**Touahria, 1999**).

#### **10.1.2. Le climat**

Le climat est le principal facteur de répartition et de dynamique des écosystèmes (**Anglier, 2003 ; Ramade, 2005**). La limitation de la croissance des organismes photosynthétiques entraîne progressivement une anoxie de la masse d'eau au fond du lac (**Ricklifs et Miller, 2005**), les hautes intensités lumineuses ont une action inhibitrice sur le

mécanisme photosynthétique ainsi que sur l'activité fixatrice des microorganismes photosynthétiques fixateurs d'azote. En milieu aquatique ont observé une dominance des Chlorophycées filamenteuses en surface et des Cyanobactéries en profondeur. De ce fait ce groupe phytoplanctonique évite les surfaces trop exposées (**Anglier, 2000**).

### 10.1.3. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH est un paramètre important dans l'étude des milieux aquatiques (**Khattabi, 2002**). Il est par définition, une mesure de l'activité des ions  $H^+$  contenus dans une solution aqueuse:  $pH = -\log [H^+]$  (**Henery et Beaudry, 1992**). L'eau de mer est faiblement alcaline (basique), son pH moyen est de 8.2 avec des variations entre 7 et 8.4, il est principalement fixé par la présence des carbonates ( $CO_2-HCO_2-CO_2$ ) (**Aminot et Chaussepied, 1983**).

### 10.1.4. La salinité

La salinité représente la quantité de sels dissous dans l'eau de mer (**Giacomini et al., 1984**). Elle est définie conventionnellement comme la masse en grammes des composés solides secs à poids constant à 480°C, obtenue à partir de 1Kg d'eau mer (**Rodier, 1996**).

La Méditerranée est une mer très salée, car l'évaporation y est intense et les apports d'eau douce sont peu importants, la salinité entraîne une modification de la densité. En effet, plus une eau est salée, plus elle est dense. La salinité superficielle, dans ses grandes lignes, suit la même évolution que la température ; elle est, aussi, soumise aux variations liées aux conditions atmosphériques et aux apports d'eau douce (**Touahria, 1999**).

### 10.1.5. L'oxygène dissous

L'oxygène est un gaz qui conditionne de nombreux phénomènes, tant biologiques que chimiques et notamment de corrosion. Ses concentrations dans l'eau de mer présentent de nombreuses variations selon l'endroit, la profondeur et la saison. Ceci, s'explique par les différentes origines de l'oxygène dissous (atmosphère ou phénomènes biologiques) (**Sauriau et al., 1984-1994**). La teneur en oxygène varie dans le milieu marin en fonction de la température et de la salinité. Elle dépend aussi de l'activité biologique telle que la production d'oxygène par les végétaux autotrophes (**Touahria, 1999**).

### 10.1.6. Les nutriments

Les nutriments essentiels sont considérés comme des éléments chimiques pouvant être décelés dans l'eau de mer, mais évidemment, à des concentrations très différentes

(**Kornprobst, 2005**) pour le développement planctonique et en particulier pour le compartiment bactérien et phytoplanctonique et qui sont : le phosphore, l'azote et le silicium. Les événements climatiques et la courantologie interviennent dans l'apport et la distribution des nutriments dans le milieu. Les communautés phytoplanctoniques sont directement influencées par la quantité de nutriments disponibles dans le milieu (**Thingstad et al., 1998**). Parmi les éléments essentiels au développement du phytoplancton, on retrouve l'azote sous toutes ses formes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ) et le phosphore.

Un enrichissement modéré en nutriments favorise la production biologique en eaux côtières. En revanche, lorsqu'il devient trop important, il peut entraîner une eutrophisation du milieu. Ce phénomène d'eutrophisation peut engendrer divers effets négatifs sur l'écosystème, comme par exemple, une diminution de l'énergie lumineuse disponible dans la zone euphotique. En outre, la décomposition de la matière organique associée à la forte biomasse phytoplanctonique peut créer un déficit en oxygène dans la colonne d'eau et dans le sédiment (hypoxie – anoxie) (**Gailhard, 2003**).

#### **10.1.7. L'Azote ammoniacal**

L'azote minéral se trouve sous les formes ammoniacale, nitreuse et surtout nitrique dans l'eau de mer. Il peut être absorbé sous ces trois formes par le phytoplancton (**Lemée, 1978**). Dans l'eau, l'azote réduit soluble se retrouve sous deux formes : L'ion ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et la forme non dissociée communément appelée ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). Ces deux formes traduisent un équilibre acido-basique. L'ammoniac stimule les poussées planctoniques (**Gaujons, 1995**). Dans les eaux naturelles la détection d'ammoniac en grandes quantités est un critère de pollution (**Dussart, 1966**).

#### **10.1.8. Les nitrites ( $\text{NO}_2$ )**

Dans le cycle de l'azote, les nitrites constituent une forme intermédiaire. Ils résultent : Soit de l'oxydation partielle de l'azote ammoniacal sous l'action des bactéries nitreuses du type *Nitrosomonas* ; soit de la réduction des nitrates par les bactéries dénitrifiantes. Les nitrites disparaissent vite en milieu naturel, ils peuvent également provenir de rejets industriels puisqu'ils sont utilisés pour inhiber la corrosion (**Henry et Beaudry, 1992 ; Gaujons, 1995**).

### 10.1.9. Les nitrates (NO<sub>3</sub>)

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique. Les eaux de surface ne contiennent pas plus de 10mg/l de nitrates (**Potelon et al., 1998**). Selon **Gaujons (1995)**, les nitrates peuvent avoir plusieurs origines :

- Minéralisation de la matière organique ;
- Engrais azotés ;
- Résidus animaux, fumier, purin ;
- Eaux usées domestiques et stations d'épuration.

L'intérêt des nitrates réside, non seulement, dans leur rôle d'indicateur de pollution, mais aussi, et surtout dans leur rôle de fertilisant des eaux puisque, c'est essentiellement, sous cette forme que les plantes assimilent l'azote associé aux phosphates. Les nitrates favorisent la croissance, parfois exagérée, de la flore aquatique microscopique et macroscopique, ce qui peut ensuite entraîner une baisse de la teneur en oxygène dissous (**Beaudry et Henry, 1992**).

### 10.1.10. Le phosphore

D'après **Dussart (1966)**, le phosphore est le métalloïde le plus nécessaire à la vie aquatique, le moins abondant en général et celui qui se présente sous la forme la plus simple, celle d'orthophosphate. Le phosphore est essentiel pour la croissance cellulaire, en intervenant dans de nombreuses réactions cellulaires, tels que : le transfert d'énergie, la biosynthèse des acides nucléiques, ...etc. En ce qui concerne la production phytoplanctique, la forme préférée pour les microalgues, c'est l'orthophosphates (PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Bien que la biomasse algale contienne moins de 1% de P, c'est souvent l'élément le plus limitant pour la production primaire. Ceci s'explique par son association facile à d'autres ions (Fe, CO<sub>2</sub><sup>-</sup> par exemple) et se traduit par sa précipitation, qui le rend inutilisable par les algues. En Méditerranée, le phosphore est l'élément le plus souvent limitant (**Krom et al., 1991 ; Rossi, 2008**).

### 10.1.11. La concentration en chlorophylle a.

La chlorophylle a est un pigment indispensable à la photosynthèse des algues, Son dosage sert à estimer la biomasse phytoplanctonique du milieu aquatique. Les concentrations en chlorophylle dans les eaux superficielles présentent une variabilité saisonnière, sur le développement phytoplancton qu'est en effet, tributaire de l'énergie

lumineuse, de la concentration en sels nutritifs, de la stabilité des masses d'eaux et de l'intensité de la consommation par le zooplancton (**Lorenzen, 1967**).

## 10.2. Facteurs d'origine biotique

Appelés aussi facteurs dépendants de la densité ; correspondant à l'ensemble des interactions entre individus (prédation, compétition, mutualisme...etc.)(**Leveque, 2001**). Etendant sa définition (**Ramade, 2005**) réunit sous ce vocable la totalité des paramètres physico-chimiques ou biologiques qui découlent de l'existence de l'action des êtres vivants entre eux et sur les milieux. Cet auteur distingue :

- Les facteurs physico-chimiques d'origine biotique conséquences des activités métaboliques et par les sécrétions dans le milieu de substances favorables ou toxiques pour les autres espèces.
- Les facteurs trophiques de nature biologique, à l'exemple des sels nutritifs libérés dans les eaux (ou le sol) sous l'action de la décomposition.
- Les facteurs intra-spécifiques, qui regroupent les interactions se déroulant à l'intérieur d'une même espèce (entre individus).
- Les facteurs interspécifiques, qui concernent les interactions entre populations d'espèces différentes (facteurs de prédation et de parasitisme) (**Leveque, 2001**).

## 11. Rôle du phytoplancton dans l'écosystème aquatique

Le phytoplancton possède d'importants rôles, dont les plus connus sont :

### 11.1. Dans la photosynthèse

Le phytoplancton ne présente que 1% de biomasse d'organismes photosynthétiques sur la planète mais assure environ 45% de la production primaire (fixation du carbone minéral (CO<sub>2</sub>) en carbone organique). Il est à la base de la nourriture de plupart des poissons, qui fixent eux-mêmes une quantité considérable de carbonate de calcium (**Harris, 1986**).

L'importance du phytoplancton dans les milieux aquatiques est due à leur capacité de synthétiser des hydrates de carbone et de l'oxygène, à partir des éléments minéraux dissous dans l'eau et de l'énergie lumineuse, selon l'équation de Redfield (**Stumm et Morgan, 1996**). Lors de la photosynthèse, le phytoplancton est capable de fixer en milieu marin entre 20.10<sup>9</sup> et 55.10<sup>9</sup> tonnes de carbone (**Mann et Lazier, 1966**).

## 11.2. Dans la chaîne alimentaire

L'importance du phytoplancton était déjà perçue chez les pêcheurs au moyen âge chez lesquels existait l'adage «qui dit poisson dit plancto » (**Trégouboff et Rose, 1957**). Le phytoplancton est situé à la base de la chaîne trophique pélagique, il est responsable d'une part essentielle de la production primaire dans les milieux aquatiques (**Reynolds, 1998**). De ce fait il conditionne la production de poissons, de moules, d'huitres, de crevettes et d'autres produits (**Hansen et al., 2001**)

## 11.3. Dans le traitement des eaux usées

Les microalgues jouent des rôles clés dans le traitement biologique des eaux usées par lagunage. Elles opèrent comme pourvoyeur d'oxygène par le biais du processus photosynthétique. Ainsi, elles favorisent l'oxydation de la matière organique en s'associant sous forme symbiotique aux bactéries (**Humenik et Hanna, 1971**). Elles peuvent même contribuer directement à l'élimination de certains dérivés organiques (**Abeliovich et Weisman, 1978 ; Pearson et al., 1987**).

- Elles assurent l'élimination, en partie, des sels nutritifs excédentaires dans les eaux résiduelles (**Kalisz, 1973; Pouliot et Delanoüe, 1985; Ergashev et Tajiev, 1986**).
- Elles agissent comme bio absorbants contribuant à l'élimination des métaux lourds et autres produits toxiques véhiculés par ces eaux (**Beker, 1983**).
- Par leur activité biologique, elles influencent négativement les conditions de vie de certaines bactéries pathogènes, conduisant ainsi à leur réduction en nombre et même leur disparition (**Parhad et Rao, 1974; Pearson et al., 1987**).

## 11.4. Autres rôles du phytoplancton

En plus des deux rôles cités ci-dessus, le phytoplancton peut être utilisé dans de nombreux domaines :

- Certaines espèces du phytoplancton, peuvent être utilisées comme des indicateurs de pollution, ainsi *Chamaesiphon polonius* et *Calothrix sp* sont caractéristiques des eaux non polluées, par contre *Oxillatoria chlorina* et *Spirulina jeneri* peuvent survivre dans les milieux très pollués et pauvres en oxygène. Cependant *Phormidium sp* est présent dans les eaux moyennement polluées (**Champiat et Larpent, 1994**).
- Certains genres de phytoplancton comme : Euglena, Volvox et Spirogyra sont des bio accumulateurs d'éléments radioactifs. Ils sont utilisés pour lutter contre ce type particulier de pollution (**Champiat et Larpent, 1994**).

- Certains genres des Cyanobactéries peuvent être utilisés comme engrais naturels dans les rizières grâce à leurs capacités de fixation de l'azote atmosphérique par des hétérocystes (**Roger, 1996**).
- Le phytoplancton est connu pour libérer dans le milieu des substances antibactériennes (**Barnabé et Barnabé-Quet, 1997**). Certaines espèces appartenant aux genres *Scenedesmus* et *Chlorella*, ont un effet inhibiteur sur *Bacillus cereus* et *Pseudomonas sp*, tandis que d'autres espèces présentent un effet biocide marqué vis à vis des Coliformes et des Salmonelles (**Champiat et Larpent, 1994**).
- *Spirulina sp* est une Cyanobactérie qui possède des qualités intéressantes pour l'alimentation et la santé, tant pour l'Homme que pour les animaux car elle est riche en protéine et en vitamine B12 (**Rafiqul et al., 2005**). Alors que *Scenedesmus*, *Chlorella* et *Oxillatoria* sont utilisées en culture semi-industrielles en vue d'obtenir des produits riches en protéines utilisables pour l'alimentation humaine ou animale (**Iltis, 1980**).

## 12. Effets bénéfiques de la prolifération des cyanobactéries

Hormis leurs effets néfastes, les cyanobactéries ont des avantages bénéfiques pour l'Homme et l'environnement qui peuvent être résumés comme suit :

- Modérer la biosphère terrestre par fixation du CO<sub>2</sub> et la libération de l'O<sub>2</sub>. Outre, la photosynthèse ; ils assurent chez certaines espèces la fixation de l'azote atmosphérique, propriété qui a fait utiliser certaines cyanophycées (*Anabaena*, *Nostoc*) comme engrais verts au même titre que les légumineuses ; elles sont donc utilisées comme source d'azote en riziculture (**Kemouguette, 2017**).
- Participent au fonctionnement du milieu et en particulier à l'autoépuration des cours d'eau (**Sabart, 2009**).
- Elles peuvent produire de nombreuses molécules chimiques dont certaines sont très utiles utilisées comme d'antibiotiques, d'antiviraux et d'antitumoraux (**Brunberg et al., 2002**).

## 13. Effets indésirables de la prolifération des cyanobactéries

La prolifération de phytoplancton a un impact direct sur la dynamique et la structure des populations et des communautés au niveau des écosystèmes aquatiques. Certaines espèces de cyanobactéries sont susceptibles de synthétiser des exotoxines à l'origine d'intoxications importantes (**Cadier, 2016**).

### 13.1. Prolifération des cyanobactéries

Plusieurs pays sont aux prises avec la prolifération de cyanobactéries dans les écosystèmes d'eau douce, ce phénomène a gagné en importance au cours des dernières décennies (**Chen et al., 2003**).

Un des problèmes majeurs lié à la prolifération des cyanobactéries est l'exposition des humains aux cyanotoxines produites via la consommation d'eau contaminée (par ex. perturbation du système nerveux, dommages au foie, irritation de la peau, cancers (**Carmichael, 2001**). Alors que le phosphore et la stabilité de la colonne d'eau semblent être les facteurs clés directement impliqués dans la prolifération des cyanobactéries, la production de cyanotoxines n'est pas nécessairement régulée par les mêmes facteurs. Par exemple, plusieurs études suggèrent que l'azote est un élément déterminant dans la production de cyanotoxines (Downing et al. 2005). Toutefois, plusieurs autres facteurs (par ex. le phosphore, la lumière, la température) montrent une corrélation avec la concentration en toxines, mais probablement parce que ces facteurs contrôlent l'abondance des espèces qui produisent ces toxines. En fait, on comprend encore mal les raisons pour lesquelles les cyanobactéries produisent des toxines (**Laurion, 2009**).

### 13.2. Cyanotoxines

La présence de toxines a été rapportée dans pratiquement toutes les régions où les cyanobactéries ont été étudiées, faisant de la cyanotoxicose un problème d'envergure mondiale. Les toxines de cyanobactéries sont généralement classées selon leur mode d'action : les hépatotoxines (foie), les neurotoxines (système nerveux) et les dermatotoxines (peau). Elles peuvent également être catégorisées selon leur structure chimique (microcystines, cylindrospermopsines, anatoxines, saxitoxines, ...etc.; ou selon leur type de molécules (alkaloides, lipopolysaccharides, polycétides et peptides) (**Suttle, 2000**). Certaines cyanotoxines peuvent s'accumuler dans les poissons, les crustacés et les mollusques consommés par les humains et ainsi causer des problèmes de santé. Par ailleurs, une toxine nommée beta-méthylamino-L-alanine (BMAA) est connue pour être bioamplifiée dans le réseau trophique (c.-à-d. une augmentation de concentration d'un maillon trophique à l'autre (**Cox et al., 2003**). Les BMAA pourraient être liées à certains décès causés par des maladies neurodégénératives (par ex. la maladie d'Alzheimer). Cet exemple souligne le besoin de mieux comprendre l'accumulation des cyanotoxines dans les produits de consommation humaine (**Laurion, 2009**).

L'exposition aux cyanobactéries a permis de démontrer leur potentiel toxique chez l'humain de manière spectaculaire (Azevedo et al., 2002). Par ailleurs, à partir d'études épidémiologiques menées en Chine, l'augmentation de l'incidence des carcinomes hépatiques dans certaines régions a été suggérée comme étant associée à l'ingestion régulière d'eau de surface contaminée par les cyanobactéries. Outre les intoxications humaines, de très nombreux cas d'intoxications aiguës d'animaux domestiques ou sauvages dues aux cyanobactéries ont été décrites sur tous les continents.

La présence de toxines a été rapportée dans pratiquement toutes les régions où les cyanotoxines ont été étudiées, faisant de la toxicose un problème d'envergure mondiale (Kemouquette, 2017). Les toxines de cyanobactéries sont généralement classées selon leur mode d'action en :

- **Hépto-toxines** : Comprennent les micro-cystines (hépta peptides cycliques), et la nodulaire toxine apparentée (penta peptide cyclique). Les variations dans la structure chimique de la microcystines-LR sont nombreuses, et 48 types différents ont été caractérisés (Sivonen, 1996). Des expositions chroniques à ces toxines peuvent provoquer des cancers (Falconer, 1996)
- **Cyto-toxines** : Comprennent principalement la Cylindrospermopsine, un alcaloïde isolé et caractérisé à partir de *Cylindrospermopsis raciborskii*. Il existe d'autres cyto-toxines indéterminées associées aux Cyanobactéries (Falconer, 1996).
- **Neuro-toxines** : Les toxines responsables sont l'anatoxine A (un alcaloïde) et l'anatoxine A (s) (un méthyle phosphate ester guanidine) (Carmichael et Falconer, 1993). Aucun cas d'intoxication n'a été répertorié, car il semble peu probable qu'un empoisonnement humain puisse survenir par suite de la consommation d'eau contaminée ou d'un contact (Falconer, 1996).
- **Dermato-toxines** : Les toxines de ce type sont : les aplysiatoxines, la débromoaplysia-toxine et la lyngbyatoxine A (Hansen et al., 2001), ces toxines sont de très puissants promoteurs tumoraux (Falconer, 1993).
- **Endotoxines lipopolysaccharidiques** : Les endotoxines de nature lipopolysaccharidique (LPS) sont des constituants de la membrane cellulaire des Cyanobactéries comme celles des autres bactéries à Gram négatif (Pitois et al., 2001). Certaines études ont montré que les LPS des Cyanobactéries seraient dix fois moins toxiques que celles des autres bactéries à Gram négatif (Codd et al., 2005). Les LPS ont

un effet toxique, lors d'un contact direct avec la peau (**World Health Organization, 1998**).

#### **14. Effets nuisibles du phytoplancton**

##### **14.1. Risque sur la santé humaine**

Certaines espèces phytoplanctoniques produisent des phycotoxines, qui sont accumulées par les organismes phytoplancton phages (**Gailhard, 2003**).

##### **14.2. Risque sur l'environnement et le cadre de vie**

- Modification de l'aspect de la ressource par une coloration inhabituel, des irisations en surface et /ou masses d'écume se déplaçant au gré des vents
- Nuisance olfactive lors de la décomposition de la prolifération (**Daifi, 2019**).

##### **14.3. Risque sur les organismes vivant**

- Perturbation de la biodiversité de l'écosystème aquatique
- Perturbation des réseaux trophique aquatiques car les cyanobactéries sont peu ou pas consommées par le zooplancton et leur prolifération effectues le plus souvent au détriment du développement des autres microorganismes
- Intoxication d'animaux domestiques ou sauvages par abreuvement a proximité d'écumes toxiques (**Daifi, 2019**).

#### **15. Applications des microalgues**

Les applications de ces microalgues sont multiples, dans l'alimentation humaine, l'alimentation animale, les cosmétiques, la pharmaceutique.

##### **15.1. Applications alimentaires**

Certaines espèces des microalgues peuvent être consommées comme des légumes. Plusieurs processus de conservation des microalgues peuvent être utilisés, elles peuvent être séchées, congelées, mises en bocaux, salées ou servies fraîches, la consommation des microalgues est traditionnelle dans de nombreux pays asiatiques.

Les principales espèces consommées sont : *Undaria pinnatifida*, *Laminaria japonica* et *Porphyra sp.* Les Japonais consomment actuellement 1,4 kg des microalgues (poids sec) par an et par habitant, les microalgues dans l'alimentation sont bénéfiques outre leurs propriétés épaississantes, gélifiantes ou stabilisantes, bien connues et largement utilisées par des industries agro-alimentaires, elles ont aussi des propriétés nutritionnelles intéressantes en alimentation humaine. L'eau de mer offre une composition

remarquablement constante. Elle contient en solution tous les éléments nécessaires au maintien de la vie, éléments que les microalgues absorbent et concentrent dans leurs tissus (Abadli et Harkati, 2015).

### **15.2. Applications pharmaceutiques**

Les extraits des microalgues sont également utilisés par le secteur pharmaceutique, les principes actifs extraits des micro- algues sont utilisés comme anti-inflammatoire œsophagien, pour lutter contre l'embonpoint, pour leur effet laxatif ou encore pour les pansements, les microalgues peuvent être utilisées dans une amélioration du confort des diabétiques. En effet certain polysaccharides issus des microalgues des côtes françaises peuvent moduler l'absorption intestinale du glucose et la réponse insulinique à l'alimentation. Par ailleurs, des oligosaccharides extraits des microalgues peuvent améliorer l'équilibre de la flore intestinale du colon, en favorisant la croissance des bactéries comme favorables pour la santé. Ces bactéries sont actuellement largement utilisées des préparations à base de lait peu caloriques, riches en vitamines et en minéraux.

Les microalgues alimentaires sont source de polysaccharides divers, très différents de ceux provenant des végétaux terrestres. Ces polysaccharides représentent entre 30% et 70% du poids sec des microalgues, selon l'espèce (Gana, 2014).

### **15.3. Applications cosmétiques**

Les microalgues utilisées par la filière cosmétique sont souvent les mêmes que celles utilisées pour les applications alimentaires. Cependant, les travaux de recherche mettent en évidence de nouvelles applications pour de nouvelles espèces. La filière cosmétique utilise les microalgues sous forme d'extraits de plantes, broyées (pour les gommages par exemple) ou en tant qu'agents de coloration. Étant donné que le marketing joue un rôle important dans l'industrie des cosmétiques, les microalgues sont souvent utilisées afin de véhiculer une image de produits naturels apportant les bienfaits de la mer (Idealg, 2014).

### **15.4. Agrofournitures et traitement de l'eau**

En agriculture, les microalgues sont principalement utilisées comme engrais ou comme ingrédient dans la fabrication d'aliment pour le bétail. Concernant les engrais, les algues sont transformées en poudre, extraits liquides ou microbilles et sont épandues sur les terres. En effet, les microalgues favorisent la croissance des plantes, la résistance aux

maladies et produisent des substances protectrices contre les agressions par les gastéropodes.

Pour l'alimentation animale, les fucales sont utilisées comme additifs alimentaires pour leurs qualités digestives. Elles sont transformées en farines mélangées à la nourriture **(Abadli et Harkati, 2015)**.

## Chapitre II : Méthodes d'étude du phytoplancton des eaux douces

### 1. Stratégie d'échantillonnage

L'échantillonnage de phytoplancton dans les eaux libres d'un lac se fait par prélèvement d'échantillons instantanés en surface ou en profondeur, ou les deux. On utilise habituellement une bouteille Van Dorn pour recueillir l'échantillon en eaux profondes en vue d'un dénombrement, mais on peut aussi utiliser un filet. Bien des espèces ou des sujets peuvent passer à travers les mailles du filet, même si elles sont petites ; en outre le filet peut perturber les colonies, et les sujets appartenant à des espèces fragiles peuvent éclater sous la pression excessive. (CCME, 2011)

#### 1.1. Méthode de prélèvement

Les techniques de prélèvement sont variables en fonction du but recherché et de la nature de l'eau à analyser. Pour une eau de surface (eau superficielle), les bouteilles stériles sont plongées à une distance qui varie de 25 à 30 cm de la surface assez loin des bords, ainsi que des obstacles naturels ou artificiels (Rodier *et al.*, 1996).

#### 1.2. Matériel de prélèvement du phytoplancton

L'échantillonnage du phytoplancton (communautés d'algues pélagiques) a été réalisé à partir de deux méthodes :

- Le prélèvement quantitatif du phytoplancton se réalise à l'aide d'une bouteille hydrologique de type VAN DORN de capacité 2,5 litres
- Le prélèvement qualitatif se fait avec l'utilisation d'un filet à plancton dont les principales caractéristiques sont les suivantes: forme conique de longueur 108 cm, de maille 55  $\mu\text{m}$  avec une ouverture de 34 cm de diamètre muni d'un collecteur
- Du formol à 5% a été utilisé pour la fixation des échantillons phytoplanctoniques.

#### 1.3. Transport et conservation

Les techniques de prélèvement sont variables en fonction du but recherché et de la nature de l'eau à analyser. Pour une eau de surface (eau superficielle), les bouteilles stériles sont plongées à une distance qui varie de 25 à 30 cm de la surface assez loin des bords, ainsi que des obstacles naturels ou artificiels (Rodier *et al.*, 1996).

## 2. Analyse des paramètres physico-chimiques

Tous les profils physico-chimiques réalisés faciliteront l'interprétation des données phytoplanctoniques (**Christophe et al., 2009**).

La température, le pH, la conductivité électrique, la salinité et de l'oxygène dissous ont été réalisées sur place à l'aide d'un multiparamètre de terrain qui consiste à faire plonger la sonde appropriée dans l'eau, après étalonnage, puis à attendre quelques secondes avant de lire le résultat de la mesure, après la stabilisation de l'affichage de ce dernier sur l'écran. En effet, Ces paramètres physicochimiques sont très sensibles aux conditions du milieu et susceptible de varier dans des proportions important s'ils ne sont pas mesurés sur site. dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels, etc. En outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques

### 2.1. Matériel de mesure des paramètres physico-chimiques

Pour cette étude, divers appareils sont utilisés pour la mesure des paramètres physiques et chimiques :

- Un navigateur GPS MLR SP 12X a servi à la localisation des stations d'échantillonnage.
- Un multiparamètre de terrain.
- Un disque de Secchi a servi à la détermination de la transparence.
- Un matériel lié à une corde graduée a permis de jauger la profondeur des cours d'eau.
- Le dosage des sels nutritifs a été effectué à l'aide d'un spectrophotomètre.
- Un turbidimètre pour la détermination de la turbidité.

### 2.2. La température

La température de l'eau en degrés Celsius (°C) joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10 (°C). L'activité métabolique des organismes aquatiques est donc également accélérée lorsque la température de l'eau s'accroît (**Villers, 2005**).

D'une façon générale, La température de l'eau affecte sa densité et sa viscosité, la solubilité des gaz et en particulier de l'oxygène, la vitesse de réactions chimiques et

biochimiques. Ces variations peuvent tuer certaines espèces aquicoles, mais également favoriser le développement d'autres espèces, ce qui entraîne un déséquilibre écologique. Chaque espèce ne peut vivre que dans un certain intervalle de températures hors duquel elle est amenée à disparaître; elle a son préférendum thermique (emprunté au latin *praeferendum*, «ce qui doit être préféré» désigne la valeur d'une variable ou d'un gradient, notamment la température, pour laquelle un organisme vivant, ou plus généralement une espèce, peut atteindre son développement optimum) qui correspond à la zone de température où l'espèce se tient le plus facilement (**Arrignon, 1991**).

### 2.3. Le potentiel hydrogène

La mesure du potentiel hydrogène (pH) des eaux usées donne une indication sur l'alcalinité ou l'acidité de ces eaux. Il est important pour la croissance des micro-organismes qui ont généralement un pH optimal variant de 6,5 à 7,5. Des valeurs du pH inférieures à 5 ou supérieures à 8,5 affectent directement la viabilité et la croissance des micro-organismes (**Mara, 1980 ; WHO., 1987**). Le pH est donc l'un des paramètres les plus importants de la qualité de l'eau. Il doit être étroitement surveillé au cours de toute opération de traitement (**Rodier et al, 1996**).

### 2.4. Conductivité électrique

La conductivité électrique est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les composés organiques sont de mauvais conducteurs. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en milli siemens par mètre (ms/m) à 20 °C. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µs/cm. L'estimation de la quantité totale de matières dissoutes peut être obtenue par la multiplication de la valeur de la conductivité par un facteur empirique dépendant de la nature des sels dissous et de la température de l'eau. La connaissance du contenu en sels dissous est importante dans la mesure où chaque organisme aquatique a des exigences propres en ce qui concerne ce paramètre. Les espèces aquatiques ne supportent généralement pas des variations importantes en sels dissous qui peuvent être observées par exemple en cas de déversements d'eaux usées (**Villers, 2005**).

## 2.5. L'oxygène dissous

L'oxygène présent dans l'eau est également d'origine biologique par la fonction chlorophyllienne exercée par les végétaux, les algues planctoniques dans les lacs, par les phanérogames aquatiques dans les zones littorales des plans d'eau. Elle conduit également à la sursaturation si la flore aquatique est abondante et l'ensoleillement élevé. L'oxygène dissous est considéré comme l'élément le mieux explicité des variations de la densité phytoplanctonique (Arrignon, 1991).

## 2.6. La salinité

La présence de sel dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximal de densité), d'autres (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencées de manière significative. Enfin certaines sont essentiellement déterminées par la qualité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique) (Merzoug, 2009).

## 3. Analyses des paramètres phytoplanctoniques du phytoplancton

### 3.1. Fixation et stockage des échantillons

L'échantillon de phytoplancton est fixé sur le terrain à l'aide d'une solution de Lugol alcalin du commerce ou préparée (afin d'obtenir une concentration finale d'environ 0,5 % dans l'échantillon, soit environ 8 gouttes pour 100 ml (ou 2,5 ml pour un flacon de 500 ml). Cette concentration finale peut s'apprécier à la couleur brun clair, orangée que doit avoir l'échantillon.

En fonction du type de milieu (acidité de l'eau par exemple), la couleur orangée peut être obtenue avec un nombre nettement supérieur de gouttes. Une décoloration peut se produire avec le temps et/ou la lumière, dans ce cas rajouter quelques gouttes de Lugol pour maintenir la fixation de l'échantillon. Le volume de conservateur ajouté doit être noté car il participe au volume final de l'échantillon. L'échantillon ainsi fixé peut être conservé au maximum 3 semaines à l'obscurité avant analyse ou 12 mois s'il est maintenu au froid et à l'obscurité entre 1 et 4 °C. Pour une conservation de plus longue durée une fixation complémentaire s'impose : glutaraldéhyde ou formol. Ce dernier présente l'inconvénient de décolorer les cellules et d'entraîner la perte des flagelles de cellules fragiles avec le temps. L'utilisation du glutaraldéhyde est alors préférée : elle se fait à une concentration finale dans

l'échantillon de 0,5 %. L'utilisation du formol doit se faire à une concentration finale de 5 % dans l'échantillon (**Christophe et al., 2009**).

### 3.1.1. Solutions de fixation des échantillons

- **La solution iodo-iodurée de Lugol alcalin** : ajouter à l'eau de l'échantillon pour une concentration finale de 0,5%, soit 8 gouttes pour 100ml afin d'obtenir une couleur brun clair. Si perte de cette couleur dans le temps alors ajouter quelques gouttes de plus. Produit non considéré comme dangereux (**Christophe et al., 2009**).
- **La solution de glutaraldéhyde** : ajouter à l'eau de l'échantillon pour une concentration finale de 0,5 %. Nocif en cas d'ingestion et toxique par inhalation. Elle provoque des brûlures et peut entraîner une sensibilisation par inhalation et par contact avec la peau. Très toxique pour les organismes aquatiques (**Christophe et al., 2009**).
- **La solution de formol** (Solution de formol du commerce à 37 % de formaldéhyde) : ajouter à l'eau de l'échantillon pour une concentration finale de 5 % (en volume). Toxique par inhalation, par contact avec la peau et par ingestion. Provoque des brûlures. Toxique: danger d'effets irréversibles très graves par inhalation, par contact avec la peau et par ingestion. Effet cancérogène suspecté - preuves insuffisantes. Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau (**Christophe et al., 2009**).

## 3.2. La microscopie

L'observation des phytoplanctons se faite par a microscopie optique inversée est la technique la plus ancienne et elle permet l'observation d'échantillons sédimentés, l'identification et le comptage des cellules phytoplanctoniques (**Utermöhl, 1931**). Ou par la méthode classique entre lame et lamelle avec l'utilisation du microscope optique.

## 3.3. Analyse qualitative

### 3.3.1. Identification des espèces

Les déterminations requièrent parfois des observations préalables au comptage réalisées au microscope droit entre lame et lamelle afin d'établir la liste floristique. Une préparation de lame de diatomées en parallèle est aussi nécessaire lorsque les diatomées sont abondantes (supérieure à environ 20 % en nombre d'individus) dans l'échantillon et non identifiables sans préparation particulière. Toutes les identifications taxinomiques sont réalisées au niveau spécifique ou en cas de difficultés ou d'incertitudes à un niveau moindre

(genre, classe,...), à l'aide des ouvrages de détermination disponibles. Il est important de se rappeler qu'il vaut mieux une bonne détermination à un niveau taxinomique moindre qu'une mauvaise à un niveau supérieur. Les ouvrages peuvent être ceux de Bourrelly (1981, 1986, 1990), Compère (de 1986 à 2002), John et *al.* (2002), Komarek et Anagnostidis (1999, 2005), Komarek et *al.* (1983), et Leitaó et *al.* (2005) pour les principaux mais aussi d'autres, plus anciens, comme la collection « Die Binnengewässer – Das Phytoplankton des Süßwassers Systematik und Biologie » ou la « L. Rabenhorst's Kryptogamen – Flora » (**Christophe et al., 2009**).

### 3.3.2. Diversité globale

La diversité d'un échantillon ou d'un site à échantillonner peut être étudiée par l'emploi de plusieurs méthodes. Celles-ci peuvent être des méthodes univariées (richesse spécifique, indice de diversité), ou des méthodes multivariées (Analyse Factorielle de Correspondances, Analyse en Composantes Principales, ...). (**Magurran, 1988**)

#### 3.3.2.1. Méthodes univariées

##### ➤ Richesse spécifique

C'est le nombre total des diverses catégories taxonomiques auxquelles appartiennent les organismes prélevés à une station d'échantillonnage. Elle mesure la diversité la plus élémentaire, fondée directement sur le nombre total d'espèces dans un site. Un grand nombre d'espèces fait augmenter la diversité spécifique. Toutefois, cette méthode dépend de la taille des échantillons et ne considère pas l'abondance relative des différentes espèces. Sa valeur écologique est donc limitée (**Travers, 1964**).

##### ➤ Indices de diversité

De nombreux indices de diversité sont ainsi proposés et permettent de donner une expression qualitative plus ou moins pertinente de la structure de l'écosystème. Dans cette étude, nous avons utilisé l'indice de Shannon et l'indice d'équitabilité de Pielou. Ces indices considèrent à la fois l'abondance et la richesse spécifique.

- **L'indice de Shannon (H)** peut se calculer sous deux formes, en utilisant le biovolume et l'effectif spécifique :

$$I_{sh} = - \sum((n_i/N) \times \log_2 (n_i/N))$$

Avec,  $n_i$  = le biovolume ou l'effectif de la  $i$ ème espèce et  $N$  est le nombre total d'individus dans l'échantillon.

- L'indice d'Équitabilité de Pielou appelé aussi de régularité, a été utilisé pour rendre compte de l'abondance relative de chaque taxon, de la régularité de la distribution des taxons et de la qualité d'organisation du peuplement. Sa formule est la suivante :

$$E' = H' / \log_2 S$$

Avec, S = le nombre total de taxons dans un échantillon.

H' = indice de Shannon-Weaver (**Ish**)

E' vaut 0 quand un seul taxon domine et 1 quand tous les taxons ont la même abondance, (**Noël, 2012**).

### 3.3.2.2. Méthodes multivariées

Ce sont des méthodes d'analyse permettant de regrouper des taxons ou des sites ayant des caractéristiques semblables. Elles indiquent avant tout le degré de ressemblance ou de disparité de la composition en espèces de différentes stations ou de la même station au cours du temps. Une forte corrélation de cause à effet ne peut être obtenue qu'en reliant les groupements de stations aux gradients mesurés de l'environnement (**Gray et Pearson 1982**). Comme toutes ces méthodes se fondent sur des critères formels, elles semblent plus objectives que d'autres (**Noël, 2012**).

## 3.4. Analyse quantitative

### 3.4.1. Comptages des espèces

Un examen rapide de la chambre, au plus faible grossissement (x4 ou x10), permet de choisir la stratégie de comptage et de vérifier que la répartition des algues est homogène. Si la répartition n'est pas homogène un nouvel échantillon doit être préparé. Le comptage est ensuite réalisé soit sur des transects soit sur plusieurs champs choisis aléatoirement dans l'ensemble de la chambre de comptage (voire l'ensemble de la chambre) habituellement à un grossissement de x400. Dans le premier cas, 1 à 4 transects peuvent être nécessaires. Dans le deuxième cas, un nombre de 30 champs minimum est préconisé. Le déplacement d'un champ à un autre doit se faire sans regarder dans les oculaires afin de ne pas biaiser le relevé. La méthode des champs s'avère être la plus rapide et la plus précise. En plus des règles générales de comptage dans des champs avec ou sans grille de comptage, il est entendu que tout filament par longueur de 100 µm, colonie ou coenobe compte pour un individu Ainsi compte pour un individu :

- un coenobe de *Scenedesmus* composé de 4 cellules ;
- une colonie d'*Asterionella formosa* souvent composée de 8 à 10 cellules ou,

- un Cryptomonas composé d'une seule cellule ;
- dans le cas de filaments, ils sont comptés par unité de 100 µm de long. Ainsi un filament de Planktothrix de 230 µm de long compte pour 3 individus. De la même façon un filament dont la longueur est inférieure à 100 µm compte aussi pour un individu (**Christophe et al., 2009**).

L'effort de comptage porte sur une surface connue (transects, champs) sur laquelle 400 individus minimum doivent être comptés, tous taxons confondus sur l'échantillon. Dans le cas d'un comptage sur des champs aléatoires en présence d'une répartition proche de 4 individus par champ, il faudra alors comptés environ 100 champs. Si le nombre de 400 individus n'a pas pu être atteint une justification précise devra être fournie. Le nombre de champs ou de transects nécessaires est noté. Au sein de ces individus le nombre de cellules par individu sera compté directement par l'opérateur sur l'échantillon pendant le comptage lorsque l'observation le permet.

Dans le cas d'organismes pluricellulaires dont les cellules sont difficilement distinguables ou trop nombreuses (Aphanizomenon ou Microcystis), le nombre de cellules pourra être estimé par individu. Pour les diatomées seules les frustules avec plastes (cellules vivantes) sont comptés. Certaines espèces habituellement coloniales comme *Microcystis aeruginosa* peuvent se rencontrer sous forme de cellules isolées. Dans ce cas l'individu compté est la cellule (**Christophe et al., 2009**)

Les taxons identifiés lors d'une première prospection de l'échantillon, non observés par la suite lors du comptage peuvent être mentionnés dans le relevé mais sans abondance. Ainsi ils participeront à la richesse du peuplement observé. Les résultats seront donnés en abondance exprimée en nombres de cellules par millilitre d'échantillon et en biovolume exprimé en millimètre cube par litre correspondant (**Christophe et al., 2009**).

En tant que concept écologique, l'abondance est une composante importante de la diversité (**Hurlbert 1971**). La méthode de comptage d'Utermöhl (1958) a été adoptée pour l'étude quantitative du phytoplancton. Cette technique s'appuie sur la sédimentation des organismes dans une cellule de comptage, d'un échantillon de volume connu. En raison de la richesse des échantillons en particules et en organismes, une dilution des échantillons a été indispensable pour faciliter les comptages tout en gardant une bonne représentativité en termes d'effectif de l'ensemble des organismes présents. Ainsi à partir des échantillons d'eau brute fixés au formol (5%), un sous échantillonnage de 5 ml a été réalisé après agitation et homogénéisation. A ces 5 ml d'échantillon, 20 ml d'eau distillée sont additionnés avant une sédimentation des particules pendant 24 heures. Suivant le type

d'organismes, l'unité de comptage a été soit une cellule, une colonie ou un filament. Dans chaque champ, le nombre d'individus (ou unité de comptage) a été déterminé. Le nombre de champs comptés est de 20 pour les espèces les plus fréquemment rencontrées dans l'échantillon (présentes dans tous les 20 champs) et de 40 pour toutes les autres espèces. Pour les colonies, le nombre de cellules par colonie a été déterminé. La répartition de ces champs sur la surface de la cellule de comptage est aléatoire avec un comptage débutant systématiquement au niveau de la partie gauche de la cellule et se terminant au niveau de sa partie droite. Le comptage s'effectue à l'aide d'un microscope inversé, et d'un objectif 40 avec des balayages de plus de 80% de la surface de la cellule de comptage avec alternance de transects. Sont pris en compte dans l'énumération, les individus dont la structure est restée intacte. Entre deux champs, les individus situés vers la partie gauche et qui ne sont pas entièrement situés dans le deuxième ne sont pas comptabilisés pour éviter la répétition de comptage d'un même individu.

Le calcul de la densité s'exprime par la formule suivante :

$$D = N_i \times R \times 1000/v$$

Avec,

**D** = densité en nombre d'individus par litre.

**N<sub>i</sub>** = moyenne du nombre d'individu d'une espèce.

**R** = rapport entre la surface de la cellule de comptage et la surface du champ oculaire.

**1000** = facteur de conversion en litre.

**v** = volume d'échantillon sédimenté en ml (5 ml généralement).

## Conclusion

A l'issue de notre étude, nous avons pu mettre en évidence la composition des communautés phytoplanctoniques des eaux douces ses classifications, identifications, caractéristiques, facteurs de croissance les plus importants, sa position dans le réseau trophique de différents écosystèmes aquatiques, son impact sur son environnement, ses dommages et son importance pour l'homme et l'environnement en général.

Nous avons également discuté des moyens et méthodes les plus importants pour étudier ces phytoplanctons quantitativement et qualitativement.

La population d'algues microscopiques ou de phytoplancton vivant dans les écosystèmes aquatiques frais se compose de cinq grands groupes, qui sont les cyanobactéries, qui sont des organismes microscopiques qui se distinguent des autres phytoplanctons en étant procaryotes, Les Chlorophytes sont des microorganismes typiquement thermophiles, photophiles et ont une préférence pour les milieux riches en nutriments azotés, Les Chromophytes qui comprend la classe des diatomées cette dernière se caractérise principalement par la présence d'une paroi cellulaire siliceuse appelée frustule et les Euglénophytes.

Le phytoplancton peut être considéré comme un indicateur de la dégradation de la qualité des eaux la présence ou l'absence de groupes sensibles (aux pollutions par exemple), donnent une indication sur la qualité des milieux. Certaines espèces, dont les Cyanobactéries, sont susceptibles de synthétiser des toxines à l'origine d'intoxications plus ou moins graves, représentant des risques important pour la santé humaine et animale. La croissance du phytoplancton vrai avec les saisons et dépendent de facteurs physicochimiques tels que la température, le pH, l'oxygène dissous et la salinité de l'eau. Ils jouent des rôles clés dans le traitement biologique des eaux usées par lagunage. La prolifération de phytoplancton à un impact direct sur la dynamique et la structure des populations et des communautés au niveau des écosystèmes aquatiques. Certaines espèces des microalgues comme *Undaria pinnatifida*, *Laminaria japonica* et *Porphyra sp.* peuvent être consommées comme des légumes. Des extraits des micro- algues sont utilisés comme anti-inflammatoire et d'autres produits pharmaceutiques.

L'étude du phytoplancton est menée de manières et des méthodes nombreuses et variées et commence par le prélèvement d'échantillons qui sont fixés directement à l'aide de

solutions, dont la plus importante est le Lugol. Parallèlement à l'échantillonnage, certains facteurs physico-chimiques de l'eau tels que la température, la salinité, le pourcentage de substances dissoutes, le degré de saturation en oxygène dissous et la conductivité électrique sont mesurés. Tous les facteurs du milieu nous donnent des indications sur les changements intervenus dans la population de phytoplancton après étude des relations entre eux.

L'observation des phytoplanctons se fait par a microscopie optique inversée selon la méthode (**Utermöhl, 1958**). Ou par la méthode classique entre lame et lamelle. L'identification des 'espèces dépend des caractéristiques morphologiques et structurelles des individus, de la forme de la cellule, de la présence de certains pigments ou de détails fins internes ou externes tels que la présence de flagelles. Elle se fait également à l'aide de références bien connues et pionnières telles que les travaux de Bourrelly (1981, 1986, 1990), Compère (de 1986 à 2002), John et *al.* (2002), Komarek et Anagnostidis (1999, 2005), Komarek et *al.* (1983), et Leitao et *al.* (2005) pour les principaux mais aussi d'autres, plus anciens.

L'étude de la diversité totale de la population de phytoplancton dans un environnement donné est réalisée en calculant plusieurs facteurs et indicateurs dont le plus important est la richesse spécifique, l'abondance, les indices de diversité comme l'indice de Shannon et l'indice d'équitabilité de Piélou et toutes autres méthodes univariées et multivariées.

## Références bibliographiques

- **Abadli M., Harkati G., 2015.** Contribution à l'inventaire des quelques micro-algues vertes d'intérêt nutritionnel dans quelques zones humides de la wilaya d'El Oued (Lac Ayata, Chott Merouane, Sife Lemnade, STEP Kouinine). Mémoire de Master. p : 7, 9.
- **Abeliovich A. & Weisman D., 1978.** Role of heterotrophic nutrition in growth of algae *Scenedesmus obliquus* in high rate oxidation ponds, *Appl. and environ. Microbiol.* 35pp:32-
- **Aminot A., Chaussepied M., 1983.** Manuel des analyses chimiques en milieu marin CNEXO, 395 pp.
- **Anglier E., 2000.** Ecologie des eaux courantes. Edit : Tec et Doc, paris p.350.
- **Anglier E., 2003.** Introduction à l'écologie. Des écosystèmes naturels à l'écosystème humain. Edit : Tec et Doc, Paris. 230P.
- **Anneville, O., Kaiblinger, C., Tadonlélé, R.D., Druart, J.C. et Dokulil, M.T., 2008.** Contribution of Long-Term Monitoring to the European Water Framework Directive Implementation. *Proceedings of Taal2007 : The 12th World Lake Conference. Sengupta, M. et Dalwani, R. (eds). pp 1122-1131.*
- **Anonyme, 2009.** La « Guerre de l'eau » : nouveau moyen de pression économique pour demain? p2.
- **Arrignon J., 1991** : Aménagement piscicole des eaux douces. 4ème éd ED : Lavoisier.631p.
- **Asconit, 2015.** Réalisation de prélèvements et d'analyses phytoplanctoniques sur 5 plans d'eau dans le bassin Artois-Picardie. Agence de l'eau artois-picardie.P 9-32.
- **Azevedo, D. A., Santos, C. Y. M., Aquino Neto, F. R., 2002.** Identification and seasonal variation of atmospheric organic pollutants in Campos dos Goytacazes, Brazil. *Atmos. Environ.* 36: 2383-2395.
- **Barnabé G. & Barnabé-Quet R., 1997.** Ecologie aménagement des eaux côtières. Lavoisier. pp: 131, 135,138.
- **Becker E. W., 1983;** Limitations of heavy metal removal from waste water by means of algae. *Wat. Res.* 17(4) pp: 459-466.
- **Bourrelly P., 1985.** Les algues bleues ou Cyanophycées, 5ème partie. Edition Boubée Paris. pp: 297,303, 457-458,606.

- **Brunberg, A. K., Blomqvist, P., 2002.** Benthic overwintering of *Microcystis* colonies under different environmental conditions. *Journal of Plankton Research*.24: 1247-1252p
- **Carmichael, W. W., 2001.** Health effects of toxin-producing cyanobacteria: The cyanohabs. *Hum. Ecol. Risk Assess.* 7: 1393-1407.
- **Cadier, M. (2016).** Diversité des communautés phytoplanctoniques en relation avec les facteurs environnementaux en mer d'Iroise : approche par la modélisation 3D, Bretagne occidentale. Doctorat: 338p.
- **Carmichael, W. W., Falconer, I. R., 1993.** Diseases related to freshwater blue-green algal toxins and control measures. In: Falconer I (ed) *Algal toxins in seafood and drinking water*. Academic. Press. London. P: 187.
- **Carpenter, S.R., Ludwig D. et Brock W.A., 1999.** "Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change", *Ecol. Appl.*, vol. 9, p. 751-771.
- **Champiat D. et Larpent J.P., 1994.** Biologie des eaux: Méthodes & Techniques, 2ème tirage. pp : 24, 37, 39.
- **Chen Y., Qin B., Teubner K. et Dokulil M. T., 2003.** Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China, *Journal of Plankton Research*, Volume 25, Issue 4, Pages 445–453
- **Chiandani G., et Vighi M., 1974.** The N: P ratio and testes with *Selenastrum* to predict eutrophication in lakes. *Water Res.*, 8 pp: 1062-1069.
- **Chorus, I., Bartram, J., 1999.** Toxic Cyanobacteria in Water: a Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management. E & FN Spon: London. 416p.
- **Christophe L-T., Jacques B. et Alain D., 2009.** Protocole standardisé d'échantillonnage, de conservation, d'observation et de dénombrement du phytoplancton en plan d'eau pour la mise en œuvre de la DCE, Cemagref, Version 3.3.1, pp.44.
- **Codd, G. A., Lindsay, J., Young, F. M., Morrison, L. F., Metcalf, J. S., 2005.** Harmful Cyanobacteria: from mass mortalities to management measures. *In: Harmful Cyanobacteria*. Huisman J. Matthijs H.C.P. & Visser P.M (eds). Dordrecht. The Netherlands. Springer. P: 1-24.
- **Collignon J., 1991.** Ecologie et biologie marine : introduction à l'halieutique. Masson, Paris. 298p.
- **Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) ; 2011.** Manuel Des Protocoles D'échantillonnage Pour L'analyse De La Qualité De L'eau Au Canada. PN 1462, ISBN 978-1-896997-79-7 PDF, Pp. 211.

- **Cox P.A., Banack S.A. et Murch S.J., 2003.** Biomagnification of cyanobacterial neurotoxins and neurodegenerative disease among the Chamorro people of Guam. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2003 Nov 11;100(23):13380-3. doi: 10.1073/pnas.2235808100. PMID: 14612559; PMCID: PMC263822.
- **CRONBERG, G. et H. ANNADOTTER, 2006.** *Manual on aquatic cyanobacteria. A photo guide and a synopsis of their toxicology*, International Society for the Study of Harmful Algae and the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation, 106 p.
- **Daifi A. et Saici L., 2019.** Approches quantitatives et qualitatives des phytoplanctons du lac Tonga mémoire de master ; université de Guelma. P13
- **Downing T. G., Sember C. S., Gehringer M. M. et Leukes W., 2005.** Medium N:P Ratios and Specific Growth Rate Comodulate Microcystin and Protein Content in *Microcystis Aeruginosa* PCC7806 and *M. Aeruginosa* UV027.” *Microbial Ecology*, vol. 49, no. 3, pp. 468–473.
- **Druart I.C et Balvay G., 2007.** Le Léman et sa vie microscopique. Ed. Quae , Versailles. 179 p.
- **Dussart B., 1966.** Limnologie : l'étude des continentales. Ed Gauthier Villars, Paris, 667p. **Dufour P. et Berland B., 1999.** Nutrient control of phytoplanktonic biomass in atoll lagoons and Pacific Ocean waters: Studies with factorial enrichment bioassays. *Jou. Exp. Mar. Bio. Ecol.* **234** pp: 147-166.
- **Ergashev A.E. et Tajiev S.H., 1986.** Seasonal variation of phytoplankton in series of waste treatment lagoons (Chmkent, Central Asia): Artificial inoculation and role of algae in sewage purification. *Int. Res. Der. Ges. Hydrobiol.* 17 (4) pp: 545-555.
- **Falconer, I. R., 1993.** Mechanism of toxicity of cyclic peptide toxins from blue-green algae. *In:* Falconer I (ed). *Algal toxins in seafood and drinking water.* Academic Press. London. P: 177-186.
- **Falconer, I. R., 1996.** Potentiel impact on human health of toxic Cyanobacteria. *Phycologia* 35 suppl: 6-11.
- **Findley D.L et Klingh H.J ; 1994 :** protocole de la mesure de la biodiversité :le phytoplancton d'eau douce .ministère des pêches et océans institut des Eaux douces .université Crescent Winnipeg(Manitoba) R3T2N6.
- **Finkel Z.V., Irwin A.J., Schofield O., 2004.** Ressource limitation alter the ¾ size scaling of metabolic rates of phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **273**: 269-279

- **Gailhard I., 2003.** Analyse de la variabilité spatio-temporelle des populations microalgales côtières observées par le —réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY). *Thèse de Doctorat*, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II
- **Gana N., 2014.** Détermination de certains paramètres biochimiques urinaires chez le rat wistar recevant un régime cafeteria supplémenté en algues vertes. Mémoire Mastère physiopathologie cellulaire. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.41p.
- **Gaujons G., 1995.** La pollution des milieux aquatiques : aide mémoire. 2ème édition. Lavoisier, Paris 217p.
- **Giacomini V., Bertino S., Tibaldi E., 1984.** La nature : mers et côtes la faune des rivages. Volume 3, Paris.
- **Goldman C.R., 1960.** Primary production and limiting factors in three lakes of the Alaskan peninsula. *Ecol. Monogr.*, 30 pp: 207-230.
- **Grossman, A.R., D. Bhaya et Q. HE, 2001.** "Tracking the Light Environment by Cyanobacteria and the Dynamic Nature of Light Harvesting", *The journal of biological Chemistry*, vol. 276, p. 11449-11452. Lake'', *Journal of Ecology*, vol. 70, p. 829-844.
- **Hamici B. et Merabet., 2019.** Approche quantitative et qualitative du phytoplancton du lac bleu pendant la saison printanière mémoire master; université Guelma p5.6
- **Harris G.J., 1986.** Phytoplankton ecology: Structure, function and fluctuation. Chapman and Hall, London.
- **Henry M-T., Beaudry J., 1992.** Chimie des eaux, Ed le Griffon dargibe in Canada. 537p
- **Humenik F.J. & Hanna G.P., 1971.** Algal-bacterial symbiosis for removal and conservation of wastewater nutrients, *J.W.P.C.F.*, 43 (4) pp: 580-594.
- **Hansen G., Turquet J., Quod J.P., Ten Hage L., Lugomela C., Kyewalyanga M., Hurbungs M., Wawiye P., Ogongo B., Tunje S. & Rakotoarinjanahary H., 2001.** Potentially Harmful Microalgae of the Western Indian Ocean. *Manuals and Guides* 41.pp: 5, 79.
- **Hurlbert. S.H. 1971.** The nonconcept of species diversity: a critique and alternative parameters, *Ecology* **52** (1971), pp. 577–586.
- **Hutchinson G. E., 1957.** A treatise on Limnology. Vol. 1. Geography, Physico and Chemistry. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1115 p. wx **Idealg., 2014.** Étude de la consommation des algues alimentaires en France. Agro campus Ouest. France.71p.
- **Iltis A., 1980.** Les Algues 1. pp: 55.

- **ISHIKAWA, K., Kumagai M. Vincent W. F., Tsujimura S. Et Nakahara H., 2002.** "Transport and accumulation of bloom-forming cyanobacteria in a large, mid-latitude lake: The gyre-Microcystis hypothesis", *Limnology*, vol. 3, p. 87-96.
- **Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C., Wright S.W.** 1997a. Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. *Monographs on oceanographic methodology, UNESCO publishing. pp.661*
- **Jeffrey S.W., Vest M.,** 1997b. Introduction to marine phytoplankton and their pigment signatures. In *Jeffrey, S. W., R. F. C. Mantoura & S. W. Wright (eds.), Phytoplankton pigments in oceanography, pp 37-84. – UNESCO Publishing, Paris.*
- **Kafi S., 2017.** Etude de la diversité et la structure du peuplement de phytoplanctons au niveau du barrage de Tilesdit (wilaya de Bouira) mémoire master université elbaira P4
- **Kalisz I., 1973.** Role of algae in sewage purification .II. Nutrient removal, *Pol. Arch. Hydrobiol.* 20(3) pp: 413-434.
- **Kemouguette A., Khelifati A. et Merah R., 2017.** Mise en évidence de l'effet antibactérien des cyanobactéries ; mémoire de master ; université Guelma ; p5
- **Khattabi H., 2002.** Intérêts de l'études des paramètres hydrogéologiques et hydrobiologiques pour la compréhension du fonctionnement de la station de traitement des lixiviats d'ordures ménagères d'Etueffont (Belfort, France). *Thèse de doctorat 3ème cycle* 256p.
- **Kornprobst JM., 2005** Substance naturelle d'origine marine tome1 Généralités Microorganismes Algues Ed Lavoisier, Paris, 1830p.
- **Krom M.D., Kress N., Brenner S., Gordon L.I., 1991.** Phosphorus limitation of primary productivity in the eastern Mediterranean Sea. *Limnol.Oceanogr.*, **36**: 424-432.
- **L'éérable ; 2009.** Le phytoplancton des eaux douces luis leclercq ;université de tiège ;station scientifiques des hautes –fagnes p 14.16 .19.20
- **Laurion I., Rousseau A.N., Chokmani K., Drogui P., Bourget S., Warren A. et Drevnick P. 2009.** Mémoire sur la situation des lacs au Québec en regard des cyanobactéries. Québec, INRS - Centre Eau Terre Environnement (rapport de recherche 1114),
- **Lemée G., 1978.** Précis d'écologie végétale. Paris. Edition Masson.
- **Leveque C., 2001.** *De l'écologie à la biosphère.* Dunod. Paris, 502 p
- **Levitus S., 2001.** Anthropogenic warming of Earth's climate system. *Science.*, **292** : 267-270.

- **Levitus S., Antonov J., Boyer T., 2005.** Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geoph. Res. Lett.*
- **Lorenzen C.J., 1967.** *Determination of chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations.* *Limnol. Oceanogr.* 12 : 343-346.
- **Magurran A.E., 1988.** Ecological diversity and its measurement. *Princeton Univ.Press,* Princeton. 179 p.
- **Mann K.H. & Lazier J.R.N., 1966.** Dynamics of marine's ecosystems. Blackwell Science Inc. pp: 394.
- **Mara D., 1980.** Sewage treatment in hot climates, ED. John Wiley and Sons.168p.
- **Masmoudi ,S.** Dynamique du phytoplancton et caractérisation physiologique et moléculaire de trois espèces autotrophes de la saline de Sfax(Tunisie), un milieu extrémophile.. Sciences agricoles.Université du Maine, 2014. Français. NNT : 2014LEMA1015).
- **Merzoug S.E., 2009.** Etude de la qualité microbiologique et physico-chimique de l'eau de l'écosystème lacustre Garaet Hadj-Taher (Benazzouz, Wilaya de Skikda), mémoire de magister, université de Guelma .pp : 51,68.
- **Mollo, P. and A. Noury (2013).** manuel du plancton Éditions Charles Léopold Mayer: 195.
- **Moss B., 1980.**Ecology of Freshwaters. Blackwell Scientific Publications, Oxford. NP
- **Mur L.R., Skumberg O.M. &Utkilen H., 1999.** Cyanobacteria in the Environment. In: Chorus, I. et Bartram, J 1999. (Eds.). Toxic Cyanobacteria in water.A guide to their public Health consequences, monitoring and management. WHO Ed. E & FN SPON,pp: 41-111.
- **Nürnberg, G. K., 1984.** "The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia", *Limnology and Oceanography*, vol. 29, no 1, p. 111-124.
- **Oberholster, P. J., Botha, A. M., Grobbelaar, J. U., 2004.** *Microcystis aeruginosa:* source of toxic microcystins in drinking water. *Afr. J. Biotechnol.* 3(3), 159- 168.
- **Oliver, R.L. et G.G. GANF, 2000.** Freshwater blooms, p. 149-194, dans B.A. WHITTON et M. POTTS (éd.), *The Ecology of Cyanobacteria. Their diversity in time and space*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- **Padisák J., Borics G., Grigorszky I., Soróczki-Pinter E. (2006)** Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive : the assemblage index. *Hydrobiologia.* 553 : 1-14.

- **Paloheimo J.E. & Zimmerman A.P., 1983.** Factors influencing phosphorus phytoplankton relationships. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40 pp: 1804-181
- **Parhad N.M. & Raon. U., 1974.** Effect of pH on survival of *Escherichia coli*. *Jourl. Water Poll. Control. Fed.*, 46 pp: 980-986. Paris.
- **Pearson H.W., Mara D.D., Mills S.W. & Smallman D.L., 1987.** Factors determining algal population in waste stabilization ponds and the influence of algae on pond performance. *Wat. Sci. Tech.* 19 (12) pp: 131-140.
- **Peperzak L., Colijn F., Koeman R., Gieskes W.W.C., Joordens J.C.A., 2003.** Phytoplankton sinking rates in the Rhine region of fresh water influence. *J. Plankton. Res.* 25: 365-383.
- **Pitois, S., Jackson, M., Wood, B., 2001.** Sources of the eutrophication problems associated with toxic algae: An overview. *J. Envir. Health.* 64:25-32.
- **Potellon J.L., Tricard D., Buffaut P., Vial J., Saviuc P., 1998.** Le guide des analyses de l'eau potable, Ed de la lethe du cadre territorial, p. 81-117.
- **Pouliot Y. & Delanoue J., 1985.** Mise au point d'une installation pilote d'épuration tertiaire des eaux usées par production de microalgues. *Rev. Franç. des sci. de l'eau*, 4 pp: 207-222
- **Pourriot R. & Meybeck M., 1995.** Limnologie générale, Masson, Paris. 956 p.
- **Rafiqul I.M., Jalal K.C.A. & Alam M.Z., 2005.** Environmental Factors for Optimization of *Spirulina* Biomass in Laboratory Culture. *Biotechnology* 4(1) pp: 1922.
- **Ramade F., 2005.** *Eléments d'écologie : écologie appliqué.* Edit Dunod. 6 édition. Paris, 863p.
- **Ramade P., 2005.** Elements d'écologie : écologie appliquée. Edit Dunod. 6 édition. Paris, 863P.
- **Redfield A ,193).** on the proportions of organic derivatives in seawater and their relation to the coposition of plankton. university press of Liverpool
- **Redfield A.C., 1934.** On the proportion of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton, James Johnston Memorial Volume pp: 176–192.
- **Robarts R.D. & Southall G.C., 1977.** Nutrient limitation of phytoplankton growth in seven tropical man-made lakes, with special reference to Lake McIlwaine, Rhodesia. *Arch. Hydrobiol.*, 79 pp: 1-35.
- **Rodier J., Bazin C., Broutin J.P., Chambon P., Champsaur H. & Rodi L., 1996.** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8ème édit. Dunod. P :4,6.

- **Roger P.A., 1996.** Biology and Management of the Flood water Ecosystem in Rice fields. IRRI. Editor William H. Smith. pp: 132
- **Roland A. (2009)** Dynamique et diversité du phytoplancton dans le réservoir marne (bassin versant de la Seine). *Thèse de doctorat Université de Savoie pp.26*
- **Rossi N., 2008.** Ecologie des communautés planctoniques méditerranéennes et étude des métaux lourds (Cuivre, Plomb, Cadmium) dans différents compartiments de deux écosystèmes côtiers (Toulon, France). Thèse de doctorat. Université du sud Toulon-Var 201p.
- **Sabart, M ., 2009** .Variations spatiotemporelles dans la dynamique, la diversité génétique et le potentiel toxique de populations de *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) dans plusieurs écosystèmes aquatiques de la France. Thèse de doctorat de l'université de Savoie. Mention : Biodiversité, écologie environnement. p 100
- **Salsamo N., Morabito G., Buzzi F., Garibaldi L., Simona M., Mosello R. (2006)** Phytoplankton as an indicator of the water quality of the deep lakes south of the Alps. *Hydrobiologia. 563 : 167-187.*
- **Satha W et Makroudi . .S : 2015.** contribution à l'étude de la qualité bactériologique et phytolancronique de l'eau du lac oubeira (PNEK - El-TARF) Mémoire de Master. Université 8 Mai 1945 de Guelma P.1.
- **Satochi, N., Yutaka, I Masaaki, H., 2000.** Myriophyllum spicatum-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae. *J. Envir. Health 34: 3026-3032.*
- **Sauriau P.G., Guillaud J.F., 1984-1994.** Qualité des eaux. Rapport de synthèse de l'APEEL tome II, 104 p.
- **Scheffer, M., Rinaldi, S., Gragnani, A., Mur, L. R., Van Nes, E. H., 1997-**On the dominance of filamentous Cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecology 78: 272-282.*
- **Schindler D.W., 1974.** Eutrophication and recovery in experimental lakes: implications for lake management. *Science, 184 pp: 897–899.*
- **Schindler D.W., Armstrong F.A.J., Holmm3ren S.K. et Brunskill G.J., 1971.** Eutrophication of Lake 227, Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate.*J. Fish. Res. Board Can., 28 pp: 1763.1782.*
- **Sevrin-Reyssac J., Blier R., Dumes A.&Ouelette Y., 1996.** Epuration du lisier de porcs par des cultures intensives de micro-algues. *Bull. Ecol. 35 pp : 41-68*
- **Simon N., Cras A.L., Foulon E., Lemée R. (2009)** Diversity and evolution of marine phytoplankton. *C. R. Biologies 332: 159–170.*
- **Sivonen, K., 1996.** Cyanobacterial toxins and toxin production. *Phycologia 35: 12 -24.*

- **Smayda T.J., 1998.** Patterns of variability characterizing marine phytoplankton, with examples from Narragansett Bay. *ICES Journal of Marine Science Vol.55, Issue4, pp.562-573*
- **Soudant D., Belin C. (2010)** Évaluation DCE janvier 2010 Éléments d'expertise. Élément de qualité : phytoplancton. *Rapport de l'Agence de l'eau : Artois-Picardie pp.27*
- **Smayda, T.J., 1997.** Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea. *Limnol.Oceanogr. 42, 1137-1153*
- **Sommer U., Gliwicz Z., Lampert W., Duncan A., 1986.** The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol., 106: 433-471.*
- **Sonzogni W.C., Chapra S.C., Armstrong D.E. & Logan T.J., 1982.** Bioavailability of phosphorus inputs to lakes. *J. Environ. Qual., 11pp: 555–563.*
- **Soudant D., Belin C. (2010)** Évaluation DCE janvier 2010 Éléments d'expertise. Élément de qualité : phytoplancton. *Rapport de l'Agence de l'eau : Artois-Picardie pp.27*
- **Stumm W. & Morgan J.J., 1996.** Aquatic Chemistry: Chemical equilibrium and rates in natural Waters. *Wiley. Inter. Science. Publication. Third edition. pp: 1024.* Stuttgart.
- **Thingstad T.F., Zweifel U.L., Rassoulzadegan F., 1998.** P limitation of heterotrophic bacteria and phytoplankton in the northwest Mediterranean. *Limnol. Oceanogr., 43: 88-94.*
- **Thyssen M., 2008.** Analyse à haute fréquence spatiale et temporelle du phytoplancton à l'aide de la cytométrie en flux automatisée et immergeable. *Thèse de doctorat. pp.217.*
- **Thyssen M., Mathieu D., Garcia N., Denis M., 2008.** A short-term variation of the phytoplankton assemblage in the bay of Marseille (France) monitored by in situ flow cytometry. *Journal of Plankton Research Vol.30 No.9 1027-1040*
- **Thyssen M., Tarran G.A., Zubkov M., Holland R.J., Gregori G., Burkill P.H., Denis M. (2008 b)** The emergence of automated high-frequency flow cytometry: revealing temporal and spatial phytoplankton variability. *Journal of Plankton Research Vol.30 No.3 pp.333-343*
- **Touahria T., 1999.** Etude de la biomasse, de la composition et de la structure des peuplements phytoplanctonique de l'amer d'Alboran Est. *Thèse de Magister, FSB-USTHB, 200p.*
- **Travers M., 1964.** Diversité du microplancton du Golf de Marseille. Station Marine d'Endoume et Centre d'Océanographie, Marseille, France : 308-343.
- **Trégouboff G. Et Rose M., 1957.** Manuel de planctonologie méditerranéenne. Tome1. CNRS, pp: 128

- **Utermöhl H., 1958.** Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-*Method.* *Int. Ver. theor. angew. Limnol.*, **9** : 1-39.
- **VILLERS .J, SQUILBIN .M, YOURASSOWSKY. C.2005** Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface: cadre général Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement
- **Vincent W.F., 1989.** "Cyanobacterial growth and dominance in two eutrophic lakes: - Review and synthesis", *Archiv für Hydrobiologie*, vol. 32, pp: 239-254.
- **Welch E. B., 1980.** Ecological effects of waste water. Cambridge, Cambridge University Press, 337 p.
- **World Health Organization (WHO),, 1998.** Guidelines for safer ecreational water environments: coastal and freshwaters. P: 283.

## Résumé

**L**e phytoplancton est composé de l'ensemble du plancton végétal, c'est-à-dire des microorganismes photosynthétiques. Il constitue la base des chaînes alimentaires des écosystèmes aquatiques ; les micro-organismes constituant le phytoplancton sont dotés de performances et de plasticité leur permettant de coloniser tout type de milieux et est capable de réagir rapidement aux perturbations de ces milieux. Le peuplement phytoplanctonique des eaux douces se compose essentiellement de 5 embranchements les Cyanobactéries, les Chlorophytes, les Chromophytes, les Euglénophytes et les Pyrrophytes. Le phytoplancton est un bio-indicateur potentiel de la qualité des masses d'eau donc il est important de pouvoir suivre et évaluer sa composition, son abondance et sa biomasse ainsi que sa variabilité spatio-temporelle. L'étude du phytoplancton est réalisée selon plusieurs méthodes quantitatives et qualitatives, la diversité totale et la richesse spécifique, et les différents indices de diversité qui sont étudiés statistiquement. Les résultats obtenus sont également comparés et liés aux résultats de mesures des facteurs climatiques et physico-chimiques des écosystèmes aquatiques dans lesquels ils vivent, et ceci pour extraire la relation entre eux et la cinétique et les changements de ces phytoplanctons dans leur milieu naturel.

**Mots clés :** Phytoplancton, analyses physico-chimiques, analyses quantitatives et qualitatives, indices de diversité, richesse.

## **Abstract**

**P**hytoplankton is made up of all plant plankton, that is, photosynthetic microorganisms. It forms the basis of food chains in aquatic ecosystems; the microorganisms constituting phytoplankton are endowed with performance and plasticity allowing them to colonize all types of environments and are capable of reacting rapidly to disturbances in these environments. The phytoplankton population of fresh water is essentially composed of 5 branches: Cyanobacteria, Chlorophytes, Chromophytes, Euglenophytes and Pyrrhophytes. Phytoplankton is a potential bio-indicator of the quality of water bodies, so it is important to be able to monitor and assess its composition, abundance and biomass, as well as its spatio-temporal variability. The study of phytoplankton is carried out according to several quantitative and qualitative methods, total diversity and specific richness, and the various indicators of diversity which are statistically studied. The results obtained are also compared and linked to the results of measurements of climatic and physicochemical factors of the aquatic ecosystems in which they live, in order to extract the relationship between them and the kinetics and changes of this phytoplankton in their natural environment.

**Keywords:** Phytoplankton, physico-chemical analyzes, quantitative and qualitative analyzes, diversity indices, richness.

## الملخص

تتألف العوالق النباتية من جميع العوالق النباتية، أي الكائنات الحية الدقيقة التي تقوم بالتمثيل الضوئي. وهي تشكل أساس سلاسل الغذاء في النظم الإيكولوجية المائية؛ تتمتع الكائنات الحية الدقيقة التي تشكل العوالق النباتية بالحركة والليونة مما يسمح لها باستعمار جميع أنواع البيئات وهي قادرة على الاستجابة بسرعة للاضطرابات في هذه البيئات. يتكون مجتمع العوالق النباتية في المياه العذبة بشكل أساسي من 5 شعب: الـ Cyanobactéries ، و Chlorophytes ، و Chromophytes ، و Euglénophytes ، و Pyrrhophytes . تعتبر العوالق النباتية مؤشراً حيوياً محتملاً لنوعية المسطحات المائية، لذلك من المهم مراقبتها وتقييم تكوينها، ووفرتها وكتلتها الحيوية، فضلاً عن تغيرها المكاني والزمني. تتم دراسة العوالق النباتية وفقاً للعديد من الأساليب والطرق الكمية والنوعية، والتنوع الكلي والثراء النوعي، ومؤشرات التنوع المختلفة التي تمت دراستها إحصائياً. كما تتم مقارنة النتائج المتحصل عليها وربطها بنتائج قياسات العوامل المناخية والفيزيوكيميائية للأنظمة البيئية المائية التي تعيش فيها، من أجل استخلاص العلاقة بينها وبين حركية وتغيرات هذه العوالق النباتية في بيئتها الطبيعية.

**الكلمات المفتاحية:** العوالق النباتية ، التحاليل الفيزيوكيميائية ، التحاليل الكمية والنوعية ، مؤشرات التنوع ، الثراء.