

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et population  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955 - Skikda



Faculté des Sciences  
Département des Sciences de la Nature et de la Vie

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention

Du diplôme de MASTER en Ecotoxicologie Animale

Domaine D04: sciences de la nature et de la vie

Filière : Sciences Biologiques

Option : Ecotoxicologie Animale

**Contribution à l'étude taxonomique et écologique des  
diatomées benthiques de quelques cours d'eau dans  
la région de Skikda**

Présenté par :

*BOUAFIA Iness, BOUHAFRA Chaima, BOUTERFAS Sara et BOUZNAD Ihsene*


Devant le jury :

Dr BOULKENAFET F.	Président	Maître de conférences A	Université 20 Août 1955 Skikda
Dr ROUIDI S.	Examinatrice	Maître de conférences B	Université 20 Août 1955 Skikda
Dr BOUHAYENE S.	Encadreur	Maître de conférences A	Université 20 Août 1955 Skikda


Année Universitaire : 2021/2022




## *Dédicace*



*J'ai l'immense honneur de dédier ce travail à tous ceux qui me sont chers :*



*A mes parents **Bouznad Abd Rezak** et **Kouicem Wahiba**.  
Pour tout ce que vous m'avez apporté depuis mon enfance ;  
votre amour, votre soutien égard, votre disponibilité,  
l'éducation que j'ai reçue... vous m'avez donné tous les outils  
pour réussir. Rien en saurait mesurée l'estime et l'amour que je  
vous port.*



*A mes très chères sœurs, **Rahma, Marwa et Hadjer**. A mon  
cher frère **Issam**, je ne peux exprimer a traverse ces lignes tous  
les sentiments d'amour envers vous.*

*A ma grande mère fatma que dieu leur donne une langue  
et joyeux vie.*

*À mon Oncle Dr, **Bouznad Ahcen**, qui a guidé et surveillé  
le déroulement du travail de ce mémoire je te souhaite un avenir  
plein de bonheur et de santé.*

*A tous les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant surtout  
mes proches : **Djehaina, Sara, Rayan et Hana**.*

*A mon cher **Ishak** pour son présence, son assistance morale  
et ses conseils.*


*Je dédie ce mémoire.*

*Ihsene*







## *Dédicace*



*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père **Bouterfas Ahmed**.*



*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore **Laouar Naoual**.*



*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes frères, **Siraj, Sami et Wassim** et mes sœurs **Alaa et Marwa**, je dédie ce travail dont le grand plaisir leurs revient en premier lieu pour leurs conseils, aides, et encouragements.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, et mes sœurs de cœur : **Manel, Ihsene et Djehaina**.*

*À la meilleure personne au monde **Lounas**. Pour sa patience, son encouragement et soutien morale.*

*Sara*






## *Dédicace*



*Je dédie ce modeste travail*



*A mon cher père et à ma chère mère: **Bouhafra Ali, Bouria Fatiha** les mots ne suffisent guère ici pour exprimer l'amour et l'attachement que j'ai pour vous deux.*

*Aux frères les plus précieux: **Abdallah, Mohammad et Rahma.***



*A ma famille pour leur soutien et leurs encouragements.*

*A mon cher oncle **Houssein** pour son aide précieuse.*

*A mon amour **Oussama** pour sa présence dans ma vie.*

*A tous mes amis, pour leur conseil et les souvenirs des bons moments passés Ensembles : **Ledjassa Madiha, Bouafia Iness, Naass Rayen, Bendal Nessrin.***


*Enfin, A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

**CHAIMA**





## Dédicace




*Dieu soit loué, par toi je commence, et par ton Messager,  
que Dieu le bénisse et lui accorde la paix, suis*



*Je dédie le fruit de mes efforts :*

*A celle à qui Dieu a placé le ciel sous ses pieds, à celle qui  
est la plus chère dans l'existence aux plus belles roses, ma chère  
mère **Khmis Aljiya**.*



*A la mer de tendresse qui s'est sacrifiée sans conditions ni  
restrictions A celui qui a été le lien et le meilleur guide pour  
éclairer mon chemin et mon chemin vers mon cher père  
**Bouafia Bouzid**, sans oublier qui a été le soutien de mes  
frères Que Dieu prolonge leur vie et préserve leur santé et leur  
bien-être.*

*A mon amour **Haseni** pour sa présence dans ma vie.*

*A la chère, qui était le symbole de l'effort, de l'aide et du  
guide, mon amie **Wassila**,*

*A ceux avec qui j'ai partagé la douceur de vivre, mes amis  
**Naima, Abir, Madiha et Chaima**, à tous mes amis, collègues  
de la classe de Master, et à tous ceux qui m'ont soutenu et  
aidé à accomplir cette recherche, et à tous ceux qui ont oublié*

**Iness**



## ❧ *REMERCIEMENTS* ❧

Par ce modeste travail qui restera toujours notre compensation pour longues années d'étude. Nous tenons à remercier vivement : Dieu ALLAH tout puissant, qui grâce à lui, nous avons pu entreprendre nos études de biologie, et les achever dans la sérénité, et qui nous a donné le courage d'accomplir ce modeste travail, puis :

Nous tenons à remercier notre encadreur monsieur Docteur **BOUHAYENE SALAH**, pour l'honneur qu'il nous a fait en dirigeant ce travail, pour ses aides, ses conseils, tout au long de l'élaboration de ce modeste travail.

Nous remercions particulièrement Monsieur Docteur **BOULKENAFET FOUZI** qui a accepté de présider ce travail, nous tenons également à présenter nos plus vifs remerciements à madame Docteur **ROUIDI SONIA** pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant d'examiner ce mémoire.

Nous remercions sincèrement tous les enseignants de département de biologie. Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de fin d'études.

# SOMMAIRE

*Remerciements*

*Dédicaces*

*Liste des abréviations*

*Liste des tableaux*

*Liste des figures*

*Résumé*

*Abstract*

*المخلص*

**Introduction**

**1**

## **Chapitre I : Synthèse bibliographique**

<b>1. Présentation générale des diatomées</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1. Présentation des diatomées ?</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2. Structure et caractéristiques morphologiques de la cellule de diatomée</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3. Cycle de développement des diatomées</b> .....	<b>5</b>
<b>1.4. Taxonomie</b> .....	<b>6</b>
<b>1.5. Écologie</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Diatomées périphytiques dans les systèmes aquatiques et facteurs influençant leur développement dans la biofilm</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1. Structure des communautés de diatomées</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2. Facteurs influençant le développement des diatomées au sein du biofilm</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.1. Température</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.2. La lumière</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.3. Le potentiel hydrogène (pH)</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2.4. Substrat</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2.5. Nutriments</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.6. Broutement</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.7. Courant</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.8. Silice</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.9. Saprobie</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.10. Trophie</b> .....	<b>15</b>
<b>3. Utilisation des diatomées comme indicateur pour les évaluations de la qualité de l'eau</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1. Définition d'un bio-indicateur</b> .....	<b>17</b>

3.2. Intérêt du choix des diatomées .....	18
3.3. Présence des espèces et leurs caractéristiques morphologiques comme bio indicateurs .....	18
3.4. Indices écologiques .....	21
3.4.1. Indice de Shannon-Weaver .....	21
3.4.2. Indice de Simpson .....	22
3.4.3. Indice de Hill .....	23
3.5. Indices diatomiques .....	23
3.6. Réponses structurelles et fonctionnelles .....	26

## Chapitre II: Matériel et méthodes

1. Présentation de la zone d'étude.....	28
1.1. Site d'échantillonnage .....	28
1.2. Principales caractéristiques des Oueds BOULEKHRACHEF et EL-OUELDJA .....	29
1.2.1. Géographique .....	29
1.2.2. Météorologie .....	30
2. Objectif d'étude .....	30
3. Analyse des communautés des diatomées.....	30
3.1.Prélèvement des échantillons .....	30
3.2.Analyses qualitative .....	31
3.2.1. Préparation des diatomées.....	31
3.2.2. Identification .....	32
3.3.Analyses quantitative .....	32
3.4. Calcul des indices écologiques .....	34
3.4.1. Indice de Shannon-Weaver .....	34
3.4.2. Indice de Simpson .....	34
3.4.3. Indice de Hill .....	34
3.4.4. L'équitabilité .....	35
3.5. Calcul de l'indice diatomique de la qualité de l'eau .....	35
3.5.1. L'indice Diatomique Générique .....	35

## Chapitre III: Résultats et discussion

1. Résultats microscopique et interprétation des deux Oueds .....	38
1.1. Oued El Oueldja .....	38
1.2. Oued Bou Kerachef .....	42
2. Résultats microscopique comparatives entres les deux Oueds et l'interprétation .....	46

<b>3. Indices écologiques</b> .....	<b>47</b>
<b>3.1. Oued El Oueldja</b> .....	<b>47</b>
<b>3.2. Oued Bou kerachef</b> .....	<b>48</b>
<b>4. Indice diatomique Générique (IDG)</b> .....	<b>48</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>56</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>58</b>

### *Liste des abréviations :*

SPE : substance polymérique extracellulaire  
MEB : microscope électronique à balayage  
DSi : acide silicique  
SIB : silice biogénique  
ACC : Analyse canonique correspondante  
APC : analyse principale correspondante  
ACM : analyse de correspondance retirée  
ITD : indice trophique diatomées  
IT : indice Trophique  
IS : indice saprobique  
IBD : Indice biologique diatomique  
IPS : Indice de Polluosensibilité  
ADPI : Indice de diatomées d'Artois-picardie  
CEE : Indice européen  
DAIpo : Indice assemblage de diatomées pour la pollution organique  
DES : Indice de Descy  
DI-CH : Indice de diatomées Suisse  
EPI-D : Indice de pollution d'eutrophisation  
IDG : Indice de diatomées générique  
LMA : Indice de Leclercq et Maquet  
LOBO : Indice de Lobo  
IDP : Indice de diatomées de Pampean  
SHE : Indice de Steinberg et Schiefele  
SID : Indice de saprobie de Rott  
SLA : Indice de Sladeček  
ITD : Indice trophique de Rott  
UWWTD : Directive de traitement des eaux usées urbaines  
WFD : Directive-cadre de l'eau  
PICT : tolérance communautaire induite par la pollution  
IDG : Indice de diatomées générique  
HCL : acide chlorhydrique bouillant

### Liste des tableaux:

N°	Titre	Page
1	Classification des diatomées selon leur gradient optimal de température.	11
2	Classification des diatomées selon leur gradient optimal de pH.	12
3	Classification des diatomées selon le type de substrat.	13
4	Classification des diatomées selon leur préférence de vitesse de courant.	14
5	Classification des diatomées selon la saprobité	15
6	Classification des diatomées selon la condition trophique	16
7	Liste des indices de diatomées	25
8	Valeurs de l'indice diatomique indiquant les différentes classes de qualité de l'eau	36
9	Genres utilisés pour le calcul de l'indice diatomique.	37
10	Résultats du calcul des indices écologique dans le 1 <sup>er</sup> site.	47
11	Résultats du calcul des indices écologique dans le 2 <sup>eme</sup> site.	48
12	Résultats de l'IDG dans les deux Oueds	48
13	Quelques Diatomées de la région d'étude observées sous microscope optique	49

## Liste des figures :

N°	Titre	Page
1	Structure d'une cellule de diatomées ( <i>Navicula sp</i> )	4
2	Différentes formes de substances polymères extracellulaires de diatomées.	5
3	Cycle de vie des diatomées.	6
4	Clé d'identification des diatomées	7
5	Communauté d'algues périphtiques, un assemblage dominé par les algues benthiques.	9
6	Différentes formes des individus de diatomées.	20
7	Schéma d'une vue d'ensemble de l'évolution des indices fondés sur les diatomées	24
8	position géographique de la wilaya de SKIKDA	28
9	site d'échantillonnage.	29
10	position géographique d'Oued El Oueldja	29
11	position géographique d'Oued Bou Kerachef	30
12	Méthode d'échantillonnage des diatomées	31
13	La cellule de Thoma	32
14	Quadrillage de la cellule thoma	33
15	Fréquences des genres identifiant dans Oued El Oueldja	38
16	Pourcentages des genres les plus abondantes dans Oued El Oueldja	39
17	Fréquence des familles existant dans Oued El Oueldja	39
18	Différents genres des trois familles les plus représentatives dans le 1er site.	40
19	Photos des genres représentatives des familles abondantes dans le 1er site.	41
20	Fréquences des genres identifiant dans Oued Bou Kerachef	42
21	Pourcentages des genres les plus abondantes dans le 2eme site.	43
22	Fréquences des familles existantes dans le 2eme site.	43
23	Différents genres des quatre familles les plus représentatives dans le 2eme site.	44
24	Photos des genres représentatives des familles abondantes dans le 2eme site.	45
25	Fréquences des familles communes entre les deux Oueds	46
26	Fréquences des familles distinctives aux deux Oueds	47

## Résumé :

Les cours d'eaux sont des écosystèmes complexes, fragiles et régis par des lois physico-chimiques précises. Les microalgues qui les colonisent vivent en équilibre instable et en dépendent totalement. Les genres les plus tolérants s'adaptent à l'entrée d'une substance exogène ou aune modification des paramètres physico-chimiques. Nous avons utilise des diatomées comme indicatrices biologiques de la pollution aquatique dans deux hydrosystèmes : Oued "Oueldja" et Oued Bou Kerachef. Les méthodes appliquées sont celles des indices écologiques : Indice de Shannon, indice Simpson et indice de Hill. Et l'indice diatomique générique préconisé afin d'évaluer la qualité d'eau des deux Oueds et la diversité des espèces des communautés des diatomées existant.

L'observation des caractères morphologiques des diatomées récoltées nous a permis de recenser 36 taxons. Nous avons enregistré 30 taxons dans Oued "Oueldja": Au niveau du Oued "Bou Kerachef", nous avons note l'existence de 20 taxons. Les résultats de calcul des indices écologiques montrent que la population des diatomées dans ces deux Oueds est très peu diversifiée. Selon l'indice diatomique générique, nous avons classé les deux oueds comme des cours d'eaux de moyennes qualités.

Mots clés : Diatomées, Indice Diatomiques, Indice Ecologique, Qualité des cours d'eau , Skikda

## ملخص

المجاري المائية هي نظم إيكولوجية معقدة وهشة تحكمها قوانين فيزيائية كيميائية محددة. تعيش الطحالب الدقيقة التي تستعمرها في توازن غير مستقر وتعتمد عليه تمامًا. تتكيف الأجناس الأكثر تسامحًا مع دخول مادة خارجية أو مع التغييرات الفيزيوكيميائية. استخدمنا الدياتومات كمؤشرات بيولوجية للتلوث المائي في نظامين مائيين: واد «الولجة» وواد «بو كراشف». الأساليب المستخدمة هي تلك الخاصة بالمؤشرات البيئية: مؤشر شانون ، مؤشر سيمبسون ومؤشر هيل والمؤشر الثنائي الذري العام المقترح. لتقييم جودة المياه في الودان و تنوع انواع مجتمعات الدياتومات الموجودة.

سمحت لنا مراقبة الخصائص المورفولوجية للدياتومات التي تم جمعها بتحديد 36 نوع. سجلنا 30 نوع في واد «ولدجة»: على مستوى واد «بو كراشف»، لاحظنا وجود 20 نوع. تظهر نتائج حساب المؤشرات البيئية أن عدد الدياتوم في هذين الوديين قليل جدًا من التنوع. وفقًا للمؤشر الثنائي الذري العام، قمنا بتصنيف الوديين على أنهما تيارات ذات جودة متوسطة.

الكلمات المفتاحية : الدياتومات , المؤشرات ثنائية الدرة , المؤشرات البيئية , جودة المياه , سكيكدة.

## **abstract**

Water courses are complex, fragile ecosystems governed by precise physico-chemical laws. The microalgae that colonize them live in unstable equilibrium and depend totally on it. The most tolerant genera adapt to the entry of an exogenous substance or to the modification of the physico-chemical parameters. We used diatoms as biological indicators of aquatic pollution in two hydrosystems: Oued "Oueldja" and Oued Bou Kerachef. The methods used are those of ecological indices: Shannon Index, Simpson Index and Hill Index. And the generic diatomic index to assess the water quality of the two Oueds and the species diversity of existing diatom communities.

Observation of the morphological characteristics of the diatoms collected allowed us to identify 36 taxa. We recorded 30 taxa in Oued "Oueldja": At the level of the Oued "Bou Kerachef", we noted the existence of 20 taxa. The results of the calculation of ecological indices show that the diatom population in these two Wadis is very little diversified. According to the generic diatomic index, we classified the two wadis as streams of average quality.

**Keywords:** Diatoms, Diatomic Index, Ecological Index, Water Quality, Skikda

# *Introduction*

## Introduction

La croissance constante de la population humaine et l'augmentation connexe des activités industrielles, agricoles et humaines ont entraîné une pression croissante sur les écosystèmes aquatiques. Les activités anthropiques ont modifié le climat et les habitats mondiaux et ont accru l'apport de nutriments et d'un grand nombre de produits chimiques dans le système aquatique. L'augmentation de la charge en éléments nutritifs combinée aux activités humaines a entraîné l'eutrophisation, l'acidification et la pollution métallique dans de nombreux systèmes lotiques. La pollution de l'eau a considérablement réduit l'hétérogénéité environnementale et, par la suite, la biodiversité en réduisant la variabilité spatio-temporelle (**Wellnitz et Rader, 2004**). Pour une gestion durable de l'eau douce, il est essentiel de savoir dans quelle mesure le système hydroélectrique est touché par la pollution.

Deux approches principales peuvent être utilisées pour surveiller la qualité de l'eau : les analyses physiques et chimiques directes et les évaluations biologiques (**Vis et al., 1998**). L'approche traditionnelle de la gestion de la qualité de l'eau par l'utilisation d'analyses physiques et chimiques reflète les changements de la qualité de l'eau de manière rapide et directe. Ces mesures fournissent une estimation simple de l'état actuel, mais, surtout dans les cours d'eau, les caractéristiques physiques et chimiques peuvent être très variables dans le temps. Ils ne montrent pas non plus l'état écologique du système. En outre, la surveillance chimique de l'eau est limitée par un nombre extrêmement élevé de substances qui peuvent se trouver dans l'environnement lotique et plusieurs d'entre elles ne peuvent être analysées que qualitativement. L'évaluation biologique, quant à elle, permet de mieux évaluer les changements environnementaux parce que les communautés biologiques intègrent et reflètent les effets environnementaux physiques et chimiques qui se produisent sur de longues périodes (**Stevenson et Pan, 1999**). La base de l'évaluation biologique reconnaît que différentes espèces ont des tolérances variables aux facteurs de stress environnementaux. L'examen de l'abondance relative ou d'autres attributs des collectivités permet de préciser les caractéristiques des conditions environnementales des systèmes aquatiques. La qualité biologique peut être évaluée par différents types d'organismes tels que les bactéries, les protozoaires, les algues, les macroinvertébrés, les macrophytes et les poissons. Parmi celles-ci, les algues benthiques, en particulier les diatomées, sont couramment utilisées dans la biosurveillance des lacs (**DeNicola et al., 2004**), des cours d'eau (**Biggs, 1990**), des rivières (**Eloranta et Soininen, 2002; Fore et Grafe, 2002; Gold et al., 2002; Kelly, 1998**) et des estuaires (**Nayar et al., 2003**).

Les diatomées sont utilisées depuis longtemps comme outil pour évaluer les conditions environnementales variables en raison de leur grand nombre d'espèces, de leur rôle fondamental dans

le réseau trophique et de leur sensibilité aux changements environnementaux. La surveillance des conditions environnementales dans les rivières et les cours d'eau à l'aide de diatomées a donné lieu à l'élaboration de plusieurs méthodes utilisées aujourd'hui, comme les indices biotiques (**Medley et Clements, 1998; Descy et Coste, 1991; Kelly, 1998**). D'après la composition des diatomées en espèces, des tolérances écologiques des taxons et des indices ont été élaborées pour indiquer les niveaux de pollution (**Lange-Bertalot, 1979**). La densité totale des diatomées a été proposée comme indicateur général de la « santé » des rivières (**Stevenson et Pan, 1999**). Toutefois, les caractéristiques des diatomées qui réagissent aux changements de la qualité de l'eau peuvent varier. Par exemple, certaines études font état de corrélations entre l'indice de diversité ou l'autoécologie des espèces et la qualité de l'eau, tandis que d'autres documentent des réponses plus fortes de la biomasse (**Vis et al., 1998**). De telles différences peuvent être attribuées à la forte variabilité naturelle associée aux communautés de diatomées ou aux différences entre les biotopes aquatiques par rapport à leur bassin versant (rivières, ruisseaux, régions, géographie). Par conséquent, il est essentiel de connaître l'état écologique des communautés de diatomées dans le système aquatique avant d'appliquer ou d'adapter de tels indices biotiques.

Ce mémoire s'articule sur l'étude taxonomique et écologique des diatomées benthiques de quelques cours d'eau lénitique dans la région de Skikda, dont notre travail est structuré en trois chapitres:

Dans le premier **chapitre I**, nous avons consacré une synthèse bibliographique sur des généralités sur l'eau et les procédés de son traitement ;

Le second **chapitre II**, qui comporte la partie matériel et méthodes décrivant les caractéristiques générales de la zone d'étude et les méthodes d'analyse utilisées sur le terrain et au laboratoire

Le troisième **chapitre III**, est réservé à la présentation des résultats et discussion de l'ensemble des paramètres obtenus,

Nous terminerons ce mémoire avec une **conclusion**, qui rassemble les points essentiels obtenus par ce modeste travail et par des recommandations.

*Chapitre I*  
*Synthèse Bibliographique*

## Chapitre I : Synthèse Bibliographique

### 1. Présentation générale des diatomées

#### 1.1. Présentation des diatomées ?

Les diatomées sont des algues unicellulaires, microscopiques et photosynthétiques présentes dans la plupart des écosystèmes aquatiques. Elles sont appelées également *Bacillariophycées* et appartiennent à l'embranchement des *Chromophytes*.

Les diatomées constituent 25% de la biomasse totale sur Terre (**Werner, 1977**) ; il est estimé qu'elles contribuent à raison de  $1,4 \times 10^{14}$  kg de matière sèche par an. Elles contribuent également au moins à 23% de la production primaire mondiale (**Treguer et al., 1995**). La classe des diatomées comprend de très nombreuses espèces et leur nombre exact reste inconnu.

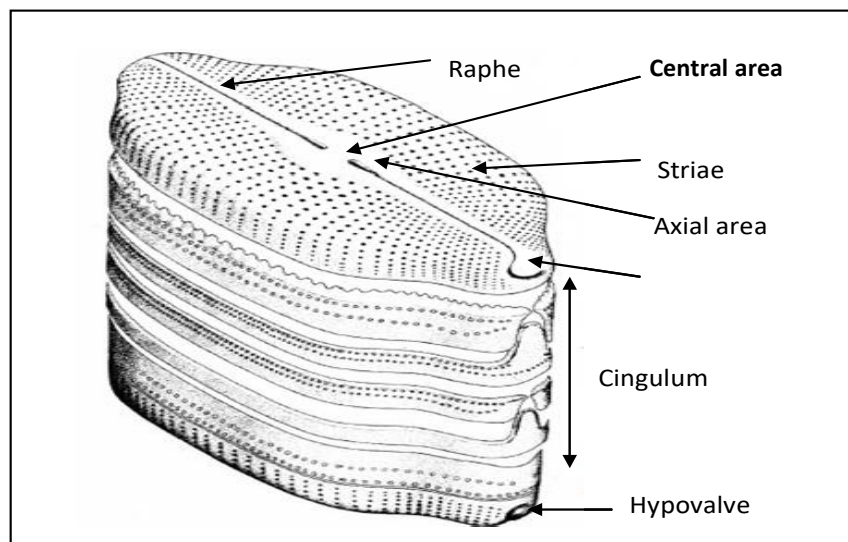
Aujourd'hui, plus de 10.000 espèces de diatomées sont connues (**Norton et al., 1996** **Poulin et Williams 1998**). Des estimations supposent un nombre d'espèces supérieur d'un facteur 10 à 1000 (**Mann et Droop 1996**) : 200.000 pour **Guillard et Kilham (1977)**, 10 millions de diatomées pour **Poulin et Williams (1998)**. En plus des diatomées contemporaines, les diatomées fossiles et subfossiles sont d'une grande importance. Les diatomées subfossiles comprennent les valves et les restes de valves de cellules planctoniques ou benthiques mortes qui subsistent dans les sédiments lacustres ou marins. On exploite les diatomées fossiles dans de nombreux gisements du monde entier sous le nom de tripoli ou diatomite. Les diatomées les plus anciennes datent de quelque 200 millions d'années (et seraient apparues à cette époque). Comme les valves de diatomées résistent très longtemps aux stress mécanique et chimique, les diatomées mortes, subfossiles et fossiles, peuvent encore être reconnues aujourd'hui et déterminées au niveau de l'espèce pour des études de paléolimnologie (**Ruggiu et Luglié, 1998**).

#### 1.2. Structure et caractéristiques morphologiques de la cellule de diatomée

Les murs des cellules de diatomées sont principalement constitués de silice sous forme de  $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  et de matière organique (**Round et al., 1990**). Formé en deux valves distinctes et interconnectées appelées frustule. La valvule ventrale (hypovalve) et la valvule dorsale (épivalve) sont réunies par une gaine, qui est composée d'une série de bandes de silice (copules) reliées ensemble le long de leurs marges (Fig.1). Chaque soupape avec sa série de bandes de gaine est appelée hypotheca et épithéca (**Round et al., 1990; van den Hoek et al., 1995**). Les valves présentent un système de nervures de silice qui se développent dans un modèle primaire circulaire ou linéaire pendant la formation (**De Stefano M et De Stefano L, 2005**). La forme, la morphologie et l'ornementation des murs de silice sont extrêmement importantes pour l'identification exacte des diatomées (**Dixit et al., 1992**). La paroi est plus mince chez les espèces planctoniques que chez les espèces benthiques (**Sládeček, 1986**). Il y a peu de chloroplastes dans une cellule; ils sont typiques

des hétérokontes et contiennent des pigments tels que la chlorophylle a, c, bêta-carotène, fucoxanthine et autres pigments donnant les diatomées leurs couleur jaune, vert ou brun. Les cellules de diatomées contiennent également toute la structure cellulaire chimique végétale : noyau, mitochondries, appareil golgi, ribosomes, vacuoles, etc. (van den Hoek *et al.*, 1995). Le mucilage ou la substance polymérique extracellulaire (SPE) est sécrété par la plupart des diatomées et il recouvre l'extérieur des frustules donnant aux diatomées la capacité d'adhérer au substrat ou de former des filaments, des colonies ou des tiges ou des tampons gélatineux (Sládeček, 1986; Round, 1990 Hoagland *et al.*, 1993).

Ainsi, les diatomées peuvent se développer à l'extrémité des tiges mucilagineuses (Fig.2) (*Achnanthes*, *Gomphonema* et *Cymbella*) ou dans des tubes mucilagineux (*Encyonema*). L'SPE est également utilisé pour maintenir des parties de différentes cellules ensemble dans des chaînes (*Tabellaria*, *Diatoma*) ou dans des colonies stellaires (*Asterionella*). La formation de colonies est également accomplie dans les diatomées par l'interdigitation des épines siliceuses sur les bords des valves des cellules adjacentes (*Fragilaria*, *Aulacoseira*).



**Figure 1** : Structure d'une cellule de diatomées (*Navicula sp*) (Round *et al.*, 1990, modifié)

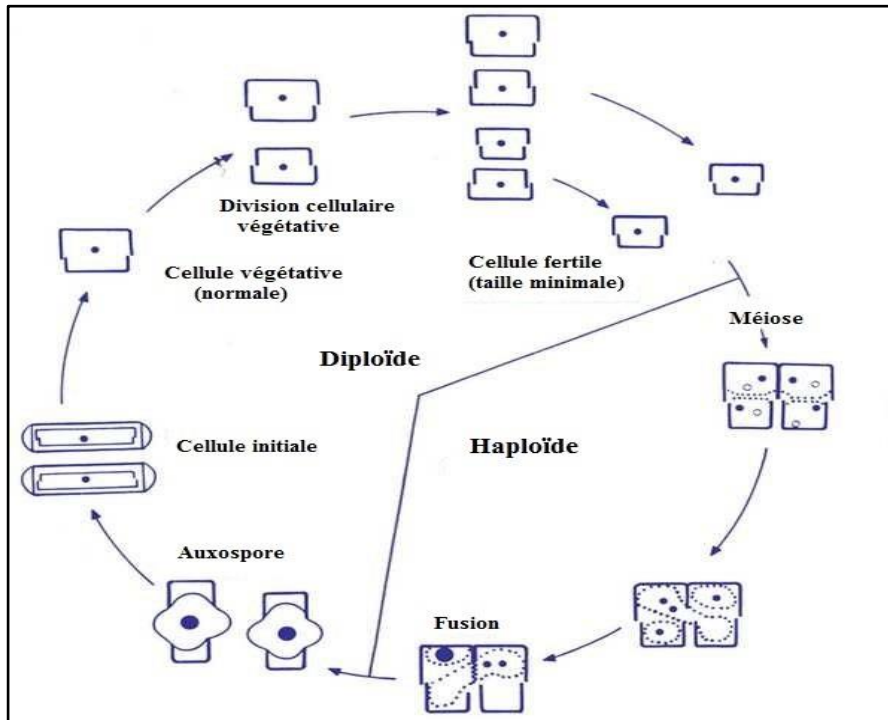


**Figure 2 :** Différentes formes de substances polymères extracellulaires de diatomées.  
(a) : Tige de *Cymbella* , (b) : Tube d'*Encyonema*, (c) : Colonie de *Melosira varians*  
et (d) : Colonie stellaire *Asterionella formosa*.  
(Source : <http://www.keweenawalgae.mtu.edu>)

### 1.3. Cycle de développement des diatomées

Le cycle de vie des diatomées comme beaucoup d'autres protistes eucaryotes, se compose de deux phases (Fig. 3). La première phase correspond à la reproduction asexuée : une division mitotique simple se produit et chaque cellule fille tient une des valves de la cellule mère. La nouvelle partie du frustule (nouvelle valve) est toujours constituée à l'intérieur de la partie de la cellule mère. En raison de la rigidité de la paroi cellulaire, les nouvelles valves formées sont légèrement plus petites que la valve parentale. Au fil du temps, comme les cellules continuent de se diviser, il en résulte une réduction de la taille des cellules. Ce phénomène peut être clairement visible dans des cultures clonales où la reproduction sexuée ne se produit pas. À la fin, de très petites cellules sont formées qui ne peuvent être viables.

La deuxième phase est la reproduction sexuée. Elle permet aux cellules de retrouver leurs tailles maximales. Au cours de cette deuxième phase, les gamètes sont produits. La reproduction est isogamique ou hétérogamique selon le taxon. Une auxospore est alors produite, qui va se développer et se diviser par mitose pour produire deux cellules, chacune avec la taille maximale rétablissant ainsi la taille initiale des cellules (Rimet, 2012).






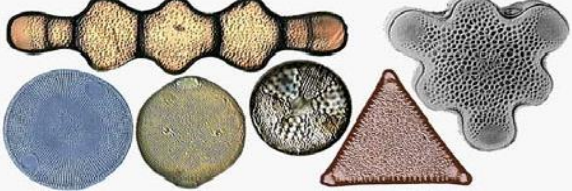
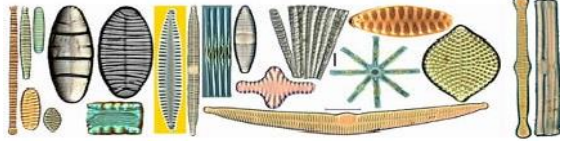

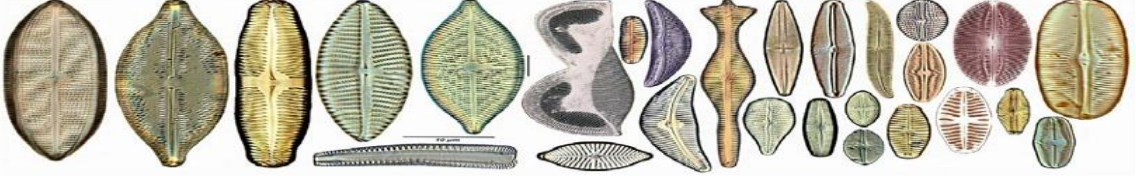
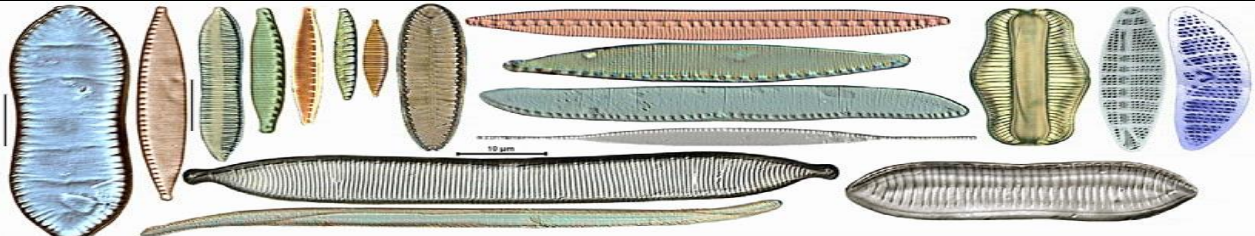
**Figure 3 :** Cycle de vie des diatomées (Barsanti et Gualtieri 2014).

#### 1.4. Taxonomie

L'identification et la classification taxonomique des diatomées sont fondées sur la structure ornementale unique des valves (Dixit et al., 1992). Les différents frustules ont des caractéristiques différentes comme la forme, la taille, la symétrie, la structure et la densité des stries, la nature du raphe et les processus sur les valves (John, 2000a). La détermination des caractéristiques morphologiques, la présence de pores spéciaux et de structures de pores peut être effectuée à l'aide de techniques de microscopes légers classiques utilisant des objectifs d'immersion d'huile à haute résolution, un contraste de phase, un contraste de phase différentiel et un éclairage de champ sombre. Depuis l'invention du microscope électronique à balayage (MEB), la compréhension des trois dimensions de la diatomée frustule et de la forme des processus a été abordée en profondeur.

Jusqu'à présent, la littérature concernant la classification des diatomées est abondante (Hustedt, 1930; Round et al., 1990; Kammer et Lange-Bertalot 1986-1991). La classe *Bacillariophyceae* subdivisée en deux groupes : diatomées centriques qui ont des stries valvulaires disposées fondamentalement dans une symétrie radiale avec un anneau ou une aréole centrale,

et des diatomées pennées dont les stries valvulaires sont disposées de façon symétrique bilatérale (Fig.4).

<b>FORMES CENTRIQUES</b>	
Cylindrique	Circulaire
	
<b>Équipés de soies (flottantes)</b>	<b>Marines ou tropicales</b>
	
<b>FORMES PENNÉES</b>	
Araphidinées (Manque de raphé)	Monoraphidinées (Réduit ou un seul raphé)
	
<b>Biraphidinées sans fibules</b>	
	
<b>Biraphidinées avec fibules</b>	
	

**Figure 4 : Clé d'identification des diatomées (M. Coste, 1999)**

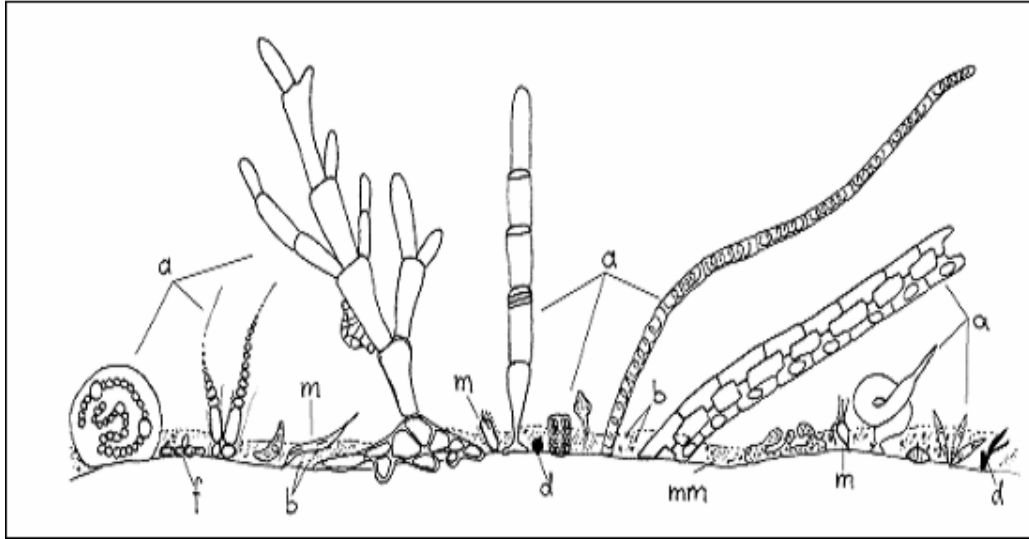
## 1.5. Écologie

Les diatomées vivent dans des conditions différentes, des milieux marins aux milieux d'eau douce (on les trouve même dans les sols humides, les aires aériennes et les mousses) et dans un large éventail de conditions environnementales, des eaux pures aux environnements extrêmes (**Elster et al., 2001**). Les communautés qui vivent dans l'eau dans des conditions naturelles comprennent généralement beaucoup plus d'espèces que celles qui se trouvent dans les habitats aériens ou dans le sol (**Patrick, 1977; van den Hoek et al., 1995**). Ils ont plusieurs modes de vie en milieu aquatique. Les diatomées planctoniques, qui vivent libres dans la colonne d'eau, sont principalement représentées par des centres isolés (*Cyclotella*, *Stephanodiscus*) ou des chaînes associées (*Melosira*, *Aulacoseira*). En outre les espèces centriques, certaines espèces de pennates sortent dans le phytoplancton comme les colonies en forme de bande (*Fragilaria*) ou en forme d'étoile (*Asterionella*, *Nitzschia*) et sont bien représentées dans le milieu aquatique. Les diatomées périphytes sont habituellement fixées à des substrats durs ou posées sur des sédiments fins (fentes et sables fins). Selon les types de substrat naturel que colonisent les diatomées périphytes, on peut les classer en : épilithe (attaché à la roche, aux graviers et aux galets); épiphyton (vivant à la surface des plantes aquatiques); epipsammon (développé à la surface du sable); epipelon (vivant sur la boue et les grains de limon); métaphore (vaguement attachée aux macrophytes et autres substrats submergés) (**Biggs, 2000**). Dans cette étude, le terme épiphyton a été utilisé également pour évoquer les différents types de communautés de diatomées énumérées ci-dessus, ce qui correspond à la définition allemande des « aufwuchs ».

## 2. Diatomées périphytiques dans les systèmes aquatiques et facteurs influençant leur développement dans la biofilm

### 2.1. Structure des communautés de diatomées

Dans les systèmes aquatiques, la surface du substrat est rapidement recouverte par une structure multicouches à savoir le biofilm (**Lowe et Pan, 1996; Ledger et Hildrew, 1998; Barranguet et al., 2000; Patil et Anil, 2005**). Le biofilm est une matrice complexe d'algues benthiques, de bactéries, de champignons et de protozoaires, et leurs produits sécrétoires sont appelés substances polymères extracellulaires (**Sekar et al., 2002; Carr et al., 2005**) (Fig.5). Lorsque la lumière domine, le biofilm est dominé par des organismes photosynthétiques (autotrophes) comme les algues. Autrement, dans des conditions de faible luminosité, elle est dominée par les bactéries (**Burn et Ryder, 2001**). Les diatomées périphytes sont une composante abondante du biofilm dans les cours d'eau et les rivières; elles constituent donc une source d'énergie importante pour les niveaux trophiques supérieurs (**Biggs, 1996, Stevenson et al., 1996**).



**Figure 5 :** Communauté d'algues périphtiques, un assemblage dominé par les algues benthiques (**a**) associées à la méiofaune (**m**), aux champignons (**f**), aux bactéries (**b**) et aux matières organiques et inorganiques non vivantes (détrit) (**d**) enfouies dans une matrice de mucopolysaccharide (**mm**).  
(Kahlert, 2001)

La structure d'un biofilm est caractéristique et dépend du niveau de développement de la communauté, des conditions hydrologiques et des substrats. Le biofilm peut avoir une couche cellulaire unique très simple ou des espèces à tiges et filamenteuses qui poussent debout, avec des épiphytes attachées (Biggs *et al.*, 1998) ou des espèces mobiles qui se déplacent dans la matrice (Van de Grinten, 2004). Le développement d'un biofilm sur substrats commence par l'adhésion d'une matrice organique et de bactéries. Les premières algues qui apparaissent sont souvent de petites diatomées pennées, puis elles sont suivies par d'autres, parfois des espèces planctoniques ou des algues vertes filamenteuses (Stevenson *et al.*, 1996; Ivorra, 2000). Le développement de diatomées attachées sur des substrats submergés est soutenu pour suivre trois phases : la phase 1 est caractérisée par des espèces de type rosette et espèces types; la phase 2 est typique des espèces productrices de tiges et la phase 3 est caractérisée par la croissance d'espèces faiblement attachées (Tuji, 2000). Après la colonisation sur substrat, les cellules colonisatrices et leurs activités connaissent une croissance exponentielle et sont régulées par la disponibilité des ressources (p. ex., lumière, nutriments) ainsi que d'autres facteurs environnementaux tels que la nature des substrats, les perturbations, le pâturage, etc. (Stevenson *et al.*, 1996). Mais, les interactions entre les algues sont également importantes dans le biofilm et de déterminer la composition des espèces de périphyton propre à interférer la concurrence en relation avec l'espace limité disponible pour l'attachement sur le substrat.

## **2.2. Facteurs influençant le développement des diatomées au sein du biofilm**

Les communautés d'algues périphytiques sont d'importantes composantes structurales et productives des écosystèmes d'eau douce. La croissance et la prospection de ces organismes dans les cours d'eau résultent d'interactions complexes entre les conditions hydrologiques, la qualité de l'eau et les facteurs biotiques utilisés pour établir l'état de référence et l'état écologique.

Le développement d'un biofilm sur des substrats commence avec l'adhérence d'une matrice organique et des bactéries. Les premières algues qui apparaissent sont souvent des petites diatomées pennées puis, elles sont suivies par d'autres espèces parfois planctoniques ou des algues vertes filamenteuses (**Stevenson *et al.*, 1996 ; Ivorra *et al.*, 2000**).

Le principal facteur qui mène à l'accumulation de biomasse d'algues périphytiques est le niveau des ressources, en particulier les nutriments et la lumière, et modérément par d'autres facteurs tels que la température qui influe sur la vitesse du métabolisme. Le principal facteur qui peut atténuer la perte de biomasse est la perturbation, souvent par le broutage. Les facteurs qui influencent potentiellement la croissance, la structure de la communauté et la distribution des algues périphytiques comprennent: la température (**De Nicola, 1996**), la disponibilité des ressources comme lumière et nutriments, la vitesse du courant, l'alcalinité la nature du substrat et le broutage (**Stevenson, 1983 ; Peterson et Stevenson, 1989 ; Steinman, 1996 ; Burkholder, 1996 ; Biggs *et al.*, 1998 ; Tison *et al.*, 2005 ; Potapova et Charles, 2005 ; Duong 2006**).

### **2.2.1. Température**

La température est le paramètre écologique qui affecte toute la vie aquatique. Les variations saisonnières de température ou variations temporelles influencent de façon importante la structure de la communauté algale (**Lamberti et Resh, 1985 ; Lavoie, 2008**). La température influe directement sur le métabolisme de diatomées et par conséquent la composition spécifique des assemblages (**Anderson, 2000**). Nous présentons la classification des diatomées selon leur gradient optimal de température (Tab.1).

La température influe sur le métabolisme de la photosynthèse des algues grâce au contrôle de la vitesse de la réaction enzymatique. En outre, la température optimale pour la photosynthèse varie également entre les espèces d'algues, ce qui suggère que les changements taxonomiques induits par la hausse des températures pourraient conduire à une augmentation des taux de la photosynthèse (**De Nicola, 1996**). En outre, la température a été influencée la sexualité chez de nombreuses espèces d'algues et surtout dans les diatomées. Et selon **Hustedt (1927-1959)** elle est préférée des espèces de diatomées dont la largeur de leur plage de température de tolérance.

**Tableau 1** : Classification des diatomées selon leur gradient optimal de température  
(Lavoie *et al.*, 2008).

	Classes	Gradient de température
1	Oligotherme	0 à 15 °C
2	Mésotherme	15 à 30 °C
3	Eutherme	30 °C et plus
4	Sténotherme	$\Delta < 5$ °C
5	Méthatherme	$\Delta = 5$ à 15 °C
6	Eurytherme	$\Delta > 15$ °C

### 2.2.2. La lumière

La lumière joue un rôle crucial dans la photosynthèse et dans la croissance des algues périphytes, la biomasse aussi et sa disponibilité influencent beaucoup de production primaire dans les systèmes lotiques en ce qui concerne la limitation des nutriments (Hill *et al.*, 1995 ; Hill, 1996). La lumière est la source d'énergie de toutes les algues périphytes, permettant aux organismes de se transformer des composés inorganiques en biomasse vivante.

Les diatomées sont en grande majorité autotrophes, bien que quelques rares espèces aient développé des stratégies leur permettant de s'affranchir de l'énergie lumineuse (Hellebust et Lewin, 1977). Leurs pigments synthétiques, chlorophylles a, c et différents caroténoïdes confèrent à leurs chloroplastes une couleur brun-jaune et leur assure un large spectre d'absorption de la lumière. D'une manière générale, il semble que les communautés périphytiques soient rarement photo inhibées et que leur réponse à la lumière soit clairement fonction de l'épaisseur du biofilm (Hill et Boston, 1991 ; Hill, 1996). On peut donc supposer qu'au sein d'une communauté photo adaptée, les espèces sélectionnées ont su développer des mécanismes de photo protection efficaces pour supporter les variations à court terme de leur environnement lumineux (Laviale *et al.*, 2008).

### 2.2.3. Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH contrôle plusieurs processus chimiques et biochimiques ainsi que certaines réactions, incluant la balance carbonate-bicarbonate, la disponibilité des nutriments, la solubilité des métaux particulièrement comme les métaux toxiques et l'aluminium, l'activité d'enzymes comme la phosphatase (**Battarbee *et al.*, 2001**). Les diatomées répondent de façon particulièrement marquée aux variations de pH, l'analyse des relations entre les communautés de diatomées et le pH a fait l'objet de beaucoup d'études. Ainsi des indices de pH ont été développés (**Håkansson, 1993** **Renberg et Helberg, 1982**). Les diatomées peuvent être classées en cinq groupes distincts selon leur gradient optimal de pH (Tab.2) (**Van Dam *et al.*, 1994**).

**Tableau 2:** Classification des diatomées selon leur gradient optimal de pH.  
(**Van Dam *et al.*, 1994**)

	Classes	Gradient de pH
1	Acidobiontique	Optimal lorsque le pH < 5,5
2	Acidophile	Généralement lorsque le pH < 7
3	Circumneutre	Généralement lorsque le pH ~ 7
4	Alkalibiontique	Exclusivement lorsque le pH > 7
5	Indifférente	Sans optimum apparent

### 2.2.4. Substrat

Les diatomées périphtiques sont présentes sur toutes sortes de supports dans les systèmes aquatiques tels que les roches, sables, débris ligneux, les sédiments et la végétation aquatique. Ce sont toutefois les diatomées épilithiques qui sont généralement échantillonnées lorsqu'il est question de communautés périphtiques ou benthiques. Bien que certaines études concluent que différents types d'habitats peuvent avoir une flore diatomique semblable (**Lavoie *et al.*, 2008**) . Les substrats artificiels ont été utilisés avec succès pour de nombreux types d'enquêtes périphtiques tels que le taux de colonisation (**Stevenson et Peterson, 1989**), les interactions communautaires, l'impact et les comparaisons de la variabilité de l'environnement (**Prygiel *et al.*, 1999** **Whitton et Rott 1996**). Le substrat en verre et une variété de matières plastiques ont été largement utilisés pour fournir un substrat standard qui peut être prélevé pour des mesures quantitatives de cultures d'algues périphtiques permanentes (**Duong, 2006**). Ainsi les diatomées sont classées selon le type de substrat (Tab.3).

**Tableau 3 :** Classification des diatomées selon le type de substrat.  
(Lavoie *et al.*, 2008)

Classes	Substrat
Épipélique	Sédiments organiques fins
Épipsammique	Grains de sable
Épilithique	Substrats durs (roches)
Épiphytique	Macrophytes
Épizoïque	Animaux

### 2.2.5. Nutriments

Les nutriments sont des facteurs majeurs influençant les assemblages périphtiques dans les systèmes lotiques. Phosphates, nitrates et silice sont généralement considérés comme les nutriments les plus importants pour la production autotrophe, bien que d'autres constituants chimiques puissent également limiter la croissance dans certaines circonstances. En faible ressource nutritive d'eau douce, le phosphate inorganique est souvent le principal facteur limitant la croissance des algues et d'autres producteurs primaires. Le nitrate d'azote tend à devenir limitant quand le phosphate est abondant (Allan, 1995). La silice est habituellement abondante en eaux douces sous forme d'acide silicique et de silice particulaire. Elle est particulièrement importante pour le développement des coquilles siliceuses des diatomées. La concentration de silice affecte la dynamique de succession des diatomées dans les ruisseaux (Patrick, 1977; Allan, 1995). Dans la plupart des écosystèmes d'eau douce, le carbone inorganique est rarement limitant puisque l'équilibre entre le CO<sub>2</sub> atmosphérique et le CO<sub>2</sub> dans l'eau est généralement atteint assez rapidement. Le CO<sub>2</sub> libre peut toutefois être limitant dans les communautés d'algues benthiques lorsque le biofilm devient très épais et dense ou lorsque le pH est supérieur à 8,5 (Wetzel et Likens, 2000 Lavoie *et al.*, 2008).

### 2.2.6. Broutement

Le broutage, en tant que facteur biotique, joue un rôle important dans la formation du biofilm dans les systèmes lotiques. Allan (1995) et Steinman (1996) ont noté que les escargots, les insectes et les larves d'insectes sont les plus importants consommateurs de biofilm. Ils n'affectent pas seulement de manière substantielle la culture sur pied du biofilm, mais aussi la composition des espèces. Les invertébrés peut être le facteur le plus important affectant la structure des communautés la composition des espèces, densité et la production primaire (Mc Cormick *et al.*, 1994). Plusieurs études ont montré que les algues sont largement consommées par les invertébrés brouteurs

(**Chessman, 1986 ; Rosemond, 1993**) et parmi elles, les diatomées sont les plus fréquemment broutées comme l'a observé **Rosemond (1993)** qui a mis en évidence la sélection de pâturage de diatomées par des escargots.

### 2.2.7. Courant

La morphologie des algues périphytes est également affectée par le courant, la longueur des tiges augmente avec la vitesse du courant (**Biggs et Hickey, 1994**). De plus, l'augmentation de la vitesse du courant stimule les processus métaboliques tels que l'absorption des nutriments photosynthèse et respiration du périphyton dans les cours d'eau (**Ghosh et Gaur, 1998**). Les effets du courant sur l'absorption de phosphates par les espèces de diatomées ont été examinés par **Schumacher et Whitford (1965)**. Ils ont indiqué que l'absorption de phosphate était 7 fois plus élevée dans un courant fort.

La forme de croissance du périphyton en courant rapide est souvent présentée par les petites diatomées qui sont étroitement attachées à des substrats alors que la grande partie des grandes formes et des cellules pédonculées faiblement attachées sur le substrat peuvent être trouvées dans les courants lents (**Stevenson, 1996; Abe et al., 2000**). Les diatomées ont été classifiées par Denys (1991) en quatre groupes selon leur préférence de vitesse de courant (Tab.4).

**Tableau 4 :** Classification des diatomées selon leur préférence de vitesse de courant (**Lavoie et al., 2008**)

	Classes	Caractéristiques du courant
1	Rhéobionte	Exclusivement eaux à fort courant
2	Rhéophile	Préférence eaux à fort courant
3	Indifférente	Indifférentes
4	Limniophile	Préférence eaux calmes

### 2.2.8. Silice

L'acide silicique (DSi) est un élément clé pour l'écosystème marin, c'est l'un des éléments nutritifs nécessaires et spécifiques pour les diatomées. Il s'accumule en particules de silice hydratée amorphe ou silice biogénique (BSI) pour former le frustule (**Martin-Jézéquel et al., 2000**). Les diatomées sont des constituants importants de la communauté de phytoplancton et de l'écosystème aquatique. Elles soutiennent d'une manière importante la chaîne alimentaire aquatique et peuvent jouer un rôle important dans l'exportation de CO<sub>2</sub> dans l'océan profond (**Tréguer et Pondaven, 2000 Ragueneau et al., 2006**). Cependant, la présence et ou la domination de ces espèces sont influencées

par la disponibilité et l'abondance relative de DSi par rapport à d'autres nutriments (**Ragueneau et al., 2006**). La principale source de DSi pour le milieu marin est l'évacuation fluviale de DSi provenant de l'altération des silicates à terre et du cycle de silice terrestre (**Tréguer et al., 1995** **Derry et al., 2005**). En eaux douces la silice est habituellement abondante sous forme d'acide silicique et de silice particulaire. L'utilisation de la silice par les diatomées peut influencer fortement le flux de silice dans les lacs et les rivières. Lorsque les concentrations en silice sont plus faibles que 0,5 mg par litre, plusieurs espèces de diatomées ne peuvent pas concurrencer efficacement avec d'autres algues non siliceuses (**Wetzel et Likens, 2000 ; Lavoie et al., 2008**).

### 2.2.9. Saprobie

La saprobie est l'ensemble des propriétés physiologiques d'un organisme conditionnant sa capacité à se développer dans un système pollué par la matière organique. La classification de saprobité de **Van Dam et al., (1994)** combine les propriétés indicatrices des diatomées pour la présence de matière organique biodégradable et les concentrations en oxygène (**Lavoie et al., 2008**) (Tab.5).

**Tableau 5:** Classification des diatomées selon la saprobité (**Lavoie et al., 2008**)

Saprobité (matière organique)	Saturation O <sub>2</sub> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)
Oligosaprobe (oxydation complète)	> 85	< 2
Beta-mésosaprobe	70 – 85	2 – 4
Alpha-mésosaprobe	25 – 70	4 – 13
Alpha-méso/polysaprobe	10 – 25	13 – 22
Polysaprobe(processus de réduction)	< 10	> 22

### 2.2.10. Trophie

Les diatomées répondent fortement et rapidement aux concentrations en nutriments. On distingue ainsi trois groupes de diatomées en fonction de la richesse du milieu en éléments nutritifs:

- ✓ Les diatomées oligotrophes qui sont des espèces faiblement tolérantes à l'enrichissement en éléments nutritifs,
- ✓ Les diatomées mésotrophes qui sont des espèces supportant des concentrations modérées.
- ✓ Les diatomées eutrophes, c.-à-d. des espèces caractéristiques des milieux riches en éléments nutritifs principalement le phosphore et l'azote. Van Dam et al. (1994) ont classé les diatomées en sept classes en fonction des conditions trophiques (**Lavoie et al., 2008**) (Tab.6).

**Tableau 6:** Classification des diatomées selon la condition trophique  
(Lavoie *et al.*, 2008)

Classes (Elements minéraux)	Condition trophique (Enrichissement)
Oligotraphentique	Très faible à faible
Oligomesotraphentique	Faible à moyen
Mésotraphentique	Moyen
Méso-eutraphentique	Moyen à élevé
Eutraphentique	Élevé
Hypereutraphentique	Très élevé
Oligo à hypereutraphentique	Indifférent

Les diatomées sont aussi influencées directement ou indirectement par d'autres facteurs abiotiques dont on peut citer : la salinité de l'eau et l'oxygénation (Van Dam *et al.*, 1994)

### 3. Utilisation des diatomées comme indicateur pour les évaluations de la qualité de l'eau

Dans les systèmes d'eau douce où les changements dans l'hydrologie sont rapides et difficiles à estimer, la surveillance biologique s'est avérée être très utile (Soininen et Könönen, 2004). La qualité biologique peut être évaluée par différents types d'organismes, tels que bactéries, protozoaires, algues, macro-invertébrés, macrophytes, mollusques et poissons. Parmi ceux-ci les diatomées ont été choisies à des fins d'évaluation de la qualité de l'eau dans de nombreuses études (Mc Cormick et Cairns, 1994 ; Whitton et Rott, 1996; Prygiel *et al.*, 1999). En particulier l'utilisation de diatomées benthiques comme bio- indicateurs dans les eaux courantes a augmenté ces dernières années en raison de leur large distribution dans l'eau et la variation de la composition des espèces qui peuvent être attribuées à des variations écologiques (Soininen et Könönen, 2004 Kelly *et al.*, 2009). Les indices de diatomées résument l'écologie complexe de rivières et ruisseaux pour permettre l'évaluation rapide de leur état général, et donc les diatomées sont largement utilisées pour évaluer l'état écologique des cours d'eau (Kelly, 2002 ; Atazadeh *et al.*, 2007 Blanco *et al.*, 2008). Les indices multimétriques diatomiques peuvent être interprétés facilement ce qui est considéré comme le principal avantage de ce type de systèmes de classification. Néanmoins il ya peu d'expérience dans l'utilisation de ces indices multimétriques pour l'évaluation biologique en Europe (Schaumburg *et al.*, 2004 ; Delgado *et al.*, 2010). Beaucoup de progrès dans l'utilisation de diatomées pour le contrôle de flux et de la qualité des cours d'eau ont été examinés par Descy et Coste (1991), Dixit *et al.*, (1992), Kelly et Whitton (1995), Stevenson et Pan (1999)

qui reconnaissent les diatomées d'avoir une distribution omniprésente, une taxonomie bien connue et une forte représentativité dans les assemblages de biofilms périphytiques. Elles sont sensibles et réagissent rapidement aux changements environnementaux. Pour tous les avantages ci-dessus les diatomées sont souvent utilisées pour surveiller l'état des cours d'eau ainsi que les changements physiques, écologiques et chimiques (**Duong, 2006**).

### **3.1. Définition d'un bion-indicateur**

La notion de bio-indicateur désigne une espèce ou une population qui, du fait des particularités écologiques des espèces composant l'assemblage, est apte à rendre compte de façon intégrée dans le temps de l'ambiance écologique régnant dans un milieu aquatique et à révéler précocement des modifications biotiques ou abiotiques de l'environnement. Pratiquement tous les organismes révèlent des informations sur leur environnement, mais certains sont plus utiles pour la surveillance de la qualité des eaux que d'autres (**Charles et Smol, 1994**). Un bio-indicateur approprié doit idéalement présenter les caractéristiques Suivantes :

- ✓ **Abondance dans le milieu et cosmopolitisme** : les organismes sélectionnés doivent permettre une application géographique et temporelle large des techniques de bio-indication.
- ✓ **Localisation en début de chaîne alimentaire**, c'est-à-dire au plus proche des transferts de nutriments et d'énergie : les producteurs primaires sont ainsi particulièrement sensibles aux variations environnementales, même légères (**Cazaubon 1991, Rott 1991**).
- ✓ **Cycle de vie simple et court**, afin de révéler les changements ponctuels ainsi que les modifications sur le long-terme (par la persistance des tendances mises en évidence sur le court-terme) (**Hellawell 1978**).
- ✓ **Facilités d'identification morphologique** jusqu'au niveau de l'espèce (**John 1998**).
- ✓ Protocoles d'échantillonnage sur le terrain simplifiés, notamment dans l'optique d'une utilisation par les opérateurs pour la surveillance en routine du niveau de qualité des eaux. Notons que les espèces autochtones reflètent mieux les changements de qualité des eaux qui composent leur environnement que les espèces exotiques a priori plus compétitives (**John 2000**).

Le bio-indicateur indique non seulement des changements environnementaux, mais fournit également des informations au sujet de l'intensité d'exposition à certaines substances par des réponses « mesurables », physiologiques, biochimiques ou comportementales. Les informations peuvent ainsi être déduites de leur contenu en composés ou éléments particuliers, de leur structure cellulaire ou morphologique, de modifications métaboliques ou biochimiques, d'études comportementales ou de la structure des populations.

### **3.2. Intérêt le choix des diatomées**

Parmi les producteurs primaires d'un milieu humide on trouve les diatomées, elles sont considérées comme les algues les plus sensibles aux conditions environnementales. De plus elles ont habituellement un cycle de vie rapide, ce qui en fait un bio-indicateur efficace pour les impacts anthropiques qui peuvent avoir lieu sur une courte période, les diatomées sont plus directement affectées par les facteurs physiques et chimiques de l'eau (**Pascale, 2010**).

Les diatomées possèdent des attributs qui en font d'excellents bio-indicateurs. Tout d'abord elles sont présentes en abondance dans la plupart des écosystèmes aquatiques et humides sur la planète. Ces organismes sont de bons indicateurs environnementaux puisqu'ils sont sensibles à la qualité de l'eau et aux variations d'autres paramètres dans leur écosystème. De plus, la structure siliceuse des diatomées est préservée, ou fossilisée, dans les sédiments aquatiques après leur mort ce qui permet la conservation des ornements et des caractéristiques sur les quelles s'appuie la taxonomie à des fins d'identification. Les plus vieux fossiles de diatomées mis à jour datent du début de la période du Crétacé. Ces fossiles contribuent à l'étude des changements environnementaux et géologiques sur de grandes échelles de temps (**Du buf et Bayer, 2002**).

L'abondance et la distribution de certaines espèces fossiles de diatomées ont permis d'effectuer des corrélations stratigraphiques entre des régions éloignées. Les diatomées sont très utilisées pour les reconstitutions paléo-environnementales et océanographiques. Les diatomées constituent une grande partie du phytoplancton des milieux aquatiques et contribuent largement à la fixation du dioxyde de carbone atmosphérique, et donc au cycle de carbone, ainsi qu'au cycle du silicium. Par ailleurs, les diatomées d'eaux douces sont de bons bio-indicateurs de la qualité des eaux puisqu'elles colonisent les milieux humides tout au long de l'année et leurs réactions aux changements environnementaux sont connues.

### **3.3. La présence des espèces et leurs caractéristiques morphologiques comme indicateurs**

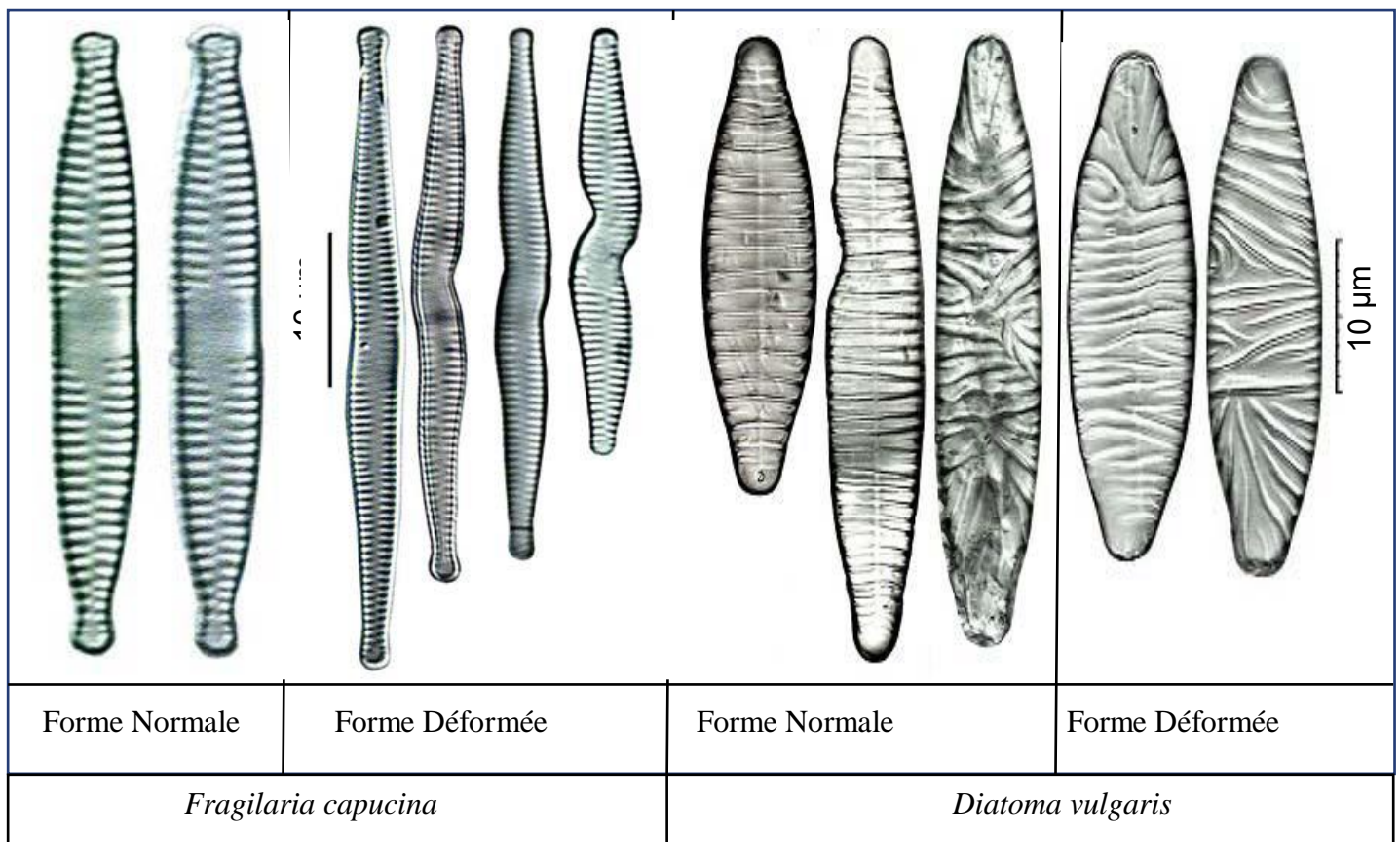
Les espèces indicatrices ou les taxons indicateurs donnent une excellente idée de la direction et de l'ampleur de la dégradation de l'écosystème (**Biggs, 2000**). L'utilisation de diatomées comme espèce indicatrice est une composante fondamentale de nombreux systèmes d'évaluation de la pollution, comme la pollution organique (**Sládecek, 1986, Rott et al., 1998**), la pollution par les métaux lourds (**Medley and Clements, 1998; Gold et al., 2002; Ivorra et al., 2000**) l'eutrophisation, et cet outil a été largement utilisé dans les pays européens et ailleurs.

De nombreuses études analytiques utilisant des statistiques multi-variables ont été effectuées sur de grands ensembles de données sur l'abondance de diatomées provenant de divers sites présentant des caractéristiques environnementales distinctes afin de trouver les principaux facteurs

qui déterminent la composition de l'espèce. Cette approche est particulièrement utile pour identifier les facteurs susceptibles d'influencer les collectivités, lorsqu'il peut y avoir des effets synergiques ou lorsque les variables causales exactes sont inconnues, et pour déterminer les effets de la pollution à la source (**Biggs, 2000**). Au milieu d'eux, l'ACC (Analyse canonique correspondante) une analyse de gradient directe, est largement utilisée. L'ACC est un outil puissant pour déterminer quels facteurs environnementaux ont le plus d'influence sur les espèces. distribution (**Dixit et al., 1992; John, 1998**). De plus, l'APC (analyse principale correspondante) et l'ACM (analyse de correspondance retirée) sont également appliqués à des fins d'analyse écologique. Ainsi, la composition en espèces des assemblages de diatomées est fortement corrélée aux variables environnementales (**Winter et Duthie, 2000; Soinenen, 2004**). Les éléments nutritifs, la température, les types de substrats, la conductivité, la turbidité, le pH et diverses pollutions sont tous des facteurs clés potentiels qui régulent la composition et la distribution des diatomées dans différentes études dans les lacs (**King et al., 2000; Lim et al., 2001**), les rivières (**Biggs, 1990; Stevenson et al., 1996 Potapova et Charles, 2003**). Bon nombre de ces études présentent des espèces indicatrices qui sont typiques pour certaines caractéristiques environnementales, par exemple pour le total concentration d'azote et de phosphate total (**Winter et Duthie, 2000**) conductivité (**Potapova et Charles, 2003**), pH (**Battarbee et al., 1986**). En raison de leur préférence et de leur tolérance à divers les variables environnementales (pH, salinité, éléments nutritifs, niveau d'oxygène, etc..) les valeurs indicatrices pour des centaines de taxons de diatomées d'eau douce ont été données (**Lange-Bertalot, 1979 Vandam et al., 1994**). Les sensibilités et les tolérances particulières des diatomées peuvent être largement utilisées pour inférer les conditions environnementales dans les écosystèmes (**Whitton et Rott, 1996; Rott et al., 1998; Prygiel et al., 1999**). Dans l'eau l'évaluation de la qualité la présence et l'absence d'espèces particulières de diatomées dont les caractéristiques écologiques sont bien connues ont été traditionnellement utilisées (**Lange-Bertalot, 1979**). Les inférences environnementales peuvent être fondées sur des espèces et des genres indicateurs uniques, comme la présence de *Nitzschia palea* ou de *Gomphonema parvulum*, indicateur d'une eau riche en nutriments et d'un niveau élevé de métal (**Medley et Clements, 1998; Ivorra, 2000 Feurtet-Mazel et al., 2003; Gold et al., 2003; Lai et al., 2003**) ou un pourcentage élevé de genres Eunotia dans l'habitat dans une zone à faible pH (**Vinebrooke et Graham, 1997 Ledger et Hildrew, 1998**), ou la présence d'*Epithemia* et de *Rhopalodia* qui apparaissent lorsque le N est faible dans les cours d'eau ou les rivières. ainsi que les valeurs indicatrices des taxons de diatomées pour certaines variables environnementales, les changements morphologiques des espèces de diatomées (téatologie, réduction de la taille) ont été suggérés pour l'indication de stress environnemental (**Gold et al., 2002; McFarland et al., 1997**).. Plusieurs études ont été menées

pour évaluer les changements de taille, de densité et de forme des diatomées Dans des conditions environnementales changeantes .La pollution aiguë a souvent été associée à l'apparition d'une déformation des diatomées. Des déformations des diatomées ont été proposées comme indicateur de la pollution par les métaux lourds et d'autres contaminants (McFarland *et al.*, 1997 Gold *et al.*, 2002; Cattaneo *et al.*, 2004; Morin *et al.*, 2006) (Fig.6). Les changements de forme morphologique donnent à penser que les métaux nuisent au fonctionnement normal de la membrane et réduisent l'absorption d'acide silicique et la synthèse d'acides aminés, ce qui entraîne des anomalies dans la formation de la paroi cellulaire des diatomées siliceuses.

Les changements dans la taille des espèces indiquent également le stress environnemental. Dans les cultures algales exposées à des niveaux élevés de contaminants, dissocier la photosynthèse de la division cellulaire peut entraîner une augmentation du volume cellulaire. Une réduction de la division cellulaire et une augmentation marquée de la taille des cellules d'*Asterionella japonica* ont été signalées lors de l'exposition à des concentrations élevées de cuivre et de zinc, ainsi que des changements dans la taille des cellules de la diatomée acidophile *Asterionella ralfsii* var. des espèces amérindiennes ont été distribuées à des ajouts d'aluminium (Fisher et Jones, 1981; Gensemer, 1990).



**Figure 6 :** Différentes formes des individus de diatomées.

### 3.4. Les Indices écologiques

#### 3.4.1. Indice de Shannon-Weaver

L'indice de diversité le plus couramment employé est l'indice de Shannon. Il est aussi appelé indice de Shannon-Wiener, bien que ces deux mathématiciens n'aient pas travaillé conjointement dessus. Historiquement, Claude Shannon était un mathématicien cryptographe qui cherchait à décrire l'entropie de caractères dans un texte (entropie de Shannon). Sa formule prend en compte la probabilité de rencontrer un caractère précis compris dans un ensemble de caractères utilisés. En écologie, le caractère est remplacé par une espèce présente et le texte étudié par le peuplement. (Shannon-Weaver, 1949).

➤ **Formulation :**  $H'$  correspond à l'indice de Shannon, selon la formulation suivante :

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln(p_i)$$

Avec :

$p_i$  = Abondance proportionnelle ou pourcentage d'abondance d'une espèce présente ( $p_i = n_i/N$ ).

$n_i$  = Nombre d'individus dénombrés pour une espèce présente.

$N$  = Nombre total d'individus dénombrés, toute espèce confondue.

$S$  = Nombre total ou cardinal de la liste d'espèces présentes.

L'indice de Shannon permet d'exprimer la diversité spécifique d'un peuplement étudié. Pour rappel, la diversité spécifique caractérise le nombre plus ou moins grand d'espèces présentes dans un peuplement. S'il est homogène (constitué d'une seule et même espèce), alors l'indice  $H' = 0$ .

Plus nous sommes en présence d'espèces différentes, plus sa valeur augmente de façon logarithmique. Il est ainsi fréquent de voir des valeurs  $H'$  comprises entre 1 et 5 pour tenir compte de la diversité spécifique. Ceci est lié au fait que l'indice de Shannon est forcément lié à la taille de l'échantillon. Enfin, la valeur  $H_{max} = \log_2(S)$  correspond à un peuplement hétérogène pour lequel tous les individus de toutes les espèces sont répartis d'une façon égale. L'indice  $H'$  varie donc entre ces deux limites.

➤ **Indice d'équitabilité de Pielou**

Pour mieux discuter cet indice de Shannon, il s'accompagne souvent de l'indice d'équitabilité de Pielou ( $J$ ), ou indice d'équirépartition ( $E$ ). Sa formule correspond au rapport entre  $H'$  et  $H_{max}$  :  $E = H'/H_{max}$ . Cet indice varie donc entre 0 et 1. S'il tend vers  $E = 1$ , alors les espèces présentes dans le peuplement ont des abondances identiques. S'il tend vers  $E = 0$ , alors nous sommes en présence d'un déséquilibre où une seule espèce domine tout le peuplement.

Ces deux indices permettent notamment de suivre les changements temporels d'un peuplement (c'est-à-dire l'ensemble des espèces d'un territoire donné partageant une écologie semblable) (Piélou, 1966).

### 3.4.2. Indice de Simpson

Cet indice proposé par le statisticien Edward H. Simpson mesure la probabilité que deux individus pris au hasard appartiennent au même groupe.

#### ➤ Formulation

Appliqué à l'écologie, l'indice de Simpson est la probabilité que deux individus sélectionnés au hasard appartiennent à la même espèce dans un peuplement. Plusieurs formes de l'indice existent dans la littérature scientifique, ce qui peut compliquer l'interprétation des valeurs.

Dans cette mémoire, nous nous appuyerons sur la probabilité que deux individus appartiennent à la même espèce selon la formule originelle de Simpson (1949) :

$$\lambda = \sum_{i=1}^S (p_i)^2$$

Avec :

$p_i$  = Proportion d'individus de l'espèce  $i$  ( $p_i = n_i/N$ ).

$S$  = Nombre total ou cardinal de la liste d'espèces présentes.

Plus cet indice est proche de 1, plus le peuplement est homogène. Aussi utilise-t-on fréquemment un second indice, ou indice de diversité, correspondant à l'indice de Simpson retranché à 1.

#### ➤ Indice de diversité

Cet indice de diversité est tout d'abord plus intuitif de lecture que l'indice de Simpson. Sa formule correspond à  $D = 1 - \lambda$ . Lorsque  $D = 0$ , alors une seule espèce est présente dans le peuplement. Si toutes les espèces ont la même probabilité  $p_i = 1/S$  de présence alors  $D = 1 - (1/S)$ . Enfin, la valeur  $D = 1$  apparaîtrait dans le cas de figure où un nombre infini d'espèces sont présentes, mais toutes de probabilité quasi-nulle.

#### ➤ Indice d'équitabilité

Il s'accompagne d'un indice d'équitabilité  $ED = D/D_{max}$ . Pour Hurlbert, le cas où toutes les espèces sont présentes selon la même probabilité correspond au maximum de l'indice de diversité soit  $D_{max} = 1 - (1/S)$ .

Une autre formulation de l'indice de Simpson qui stipule que  $D = 1/\lambda$  (indice de diversité statistique). Il devient ainsi possible de considérer que si  $ED = D/D_{max}$  alors  $D_{max} = S$ . Soit l'équation  $ED = D/S$ . Le choix de la formule est donc crucial pour comparer les résultats entre-eux.

L'indice d'équitabilité de Simpson permet de traduire la dominance d'une espèce (ED tend vers 0) ou la codominance de plusieurs espèces (ED tend vers 1).

### **3.4.3. Indice de Hill**

Cet indice propose une mesure de l'abondance proportionnelle, en comparant entre-eux les indices de Shannon et de Simpson. L'indice de diversité de Hill ainsi obtenu a pour objectif d'apprécier le rapport entre d'un côté la prise en compte des espèces abondantes (Simpson) et de l'autre l'influence des espèces rares (Shannon). L'indice de Hill apparaît donc comme un indice synthétique.

$$Hill = \frac{\lambda^{-1}}{e^{H'}}$$

Lorsque Hill tend vers 0, alors la biodiversité est plus importante. Il est également possible de convertir cette valeur en  $(1 - Hill)$  afin que l'indice soit croissant avec la biodiversité présente. Cet indice peut sembler plus pertinent dans une synthèse de résultats terrain, cependant il peut être intéressant de comparer les trois indices simultanément pour mieux apprécier la structure des communautés.

## **3.5. Les Indices diatomiques**

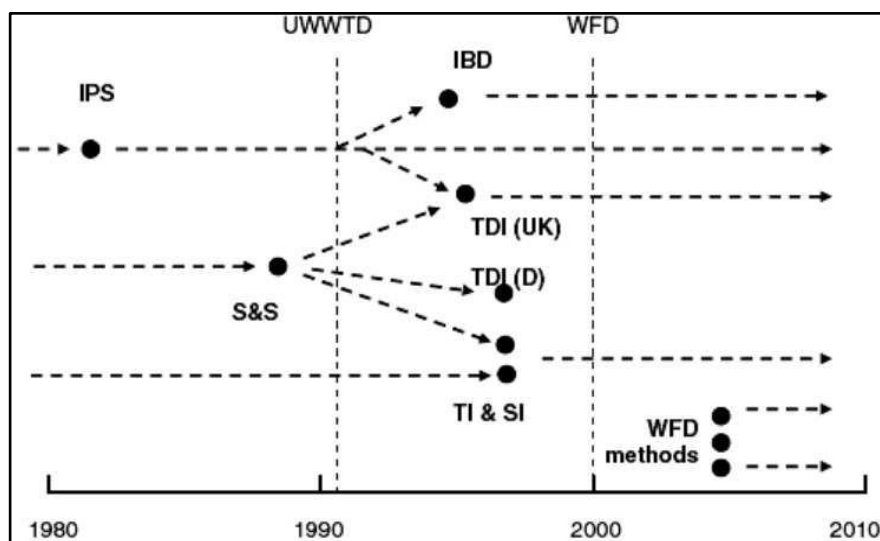
Les communautés de diatomées benthiques réagissent rapidement aux perturbations de l'eau telles que les zones touchées par la pollution. Très souvent, elles changent leur composition et la diversité des espèces qui peut varier de riches en espèces aux communautés monotones. En raison de cette caractéristique, les communautés de diatomées benthiques sont des outils utiles dans la détection des impacts anthropiques. Les diatomées sont un groupe important des écosystèmes aquatiques. Elles forment une grande partie du benthos souvent 90 à 95% et elles sont devenues une partie importante de la surveillance de la qualité de l'eau.

L'avantage est que les diatomées benthiques elles peuvent être trouvées dans toutes les eaux de surface à n'importe quel moment. Les échantillons de diatomées recueillies peuvent être conservés dans des lames pour une durée indéterminée pour une nouvelle enquête chaque fois, que nécessaire. Cependant, un inconvénient dans les enquêtes sur les diatomées est qu'elles nécessitent une connaissance approfondie de la taxonomie. Le développement des indices de la pollution de l'eau

basés sur les diatomées date avant 1980 et a été résumé par **Prygiel et al., (1999)**. Alors que de nombreux indices et approches ont été développés juste quelques-uns ont été adoptés par les organismes et les autorités locales comme il n'y avait pas d'exigence législative pour ce type de surveillance, plutôt que l'utilisation des invertébrés pour l'évaluation générale de la qualité de l'eau.

Le progrès le plus important au départ au cours des années 1980 a été celui de l'Indice de Polluosensibilité IPS (**Cemagref, 1982**). L'équation de base de **Zelinka et Marvan (1961)** a fourni une gamme d'évaluations intégrées par rapport aux différentes variables de la qualité de l'eau y compris la pollution organique, l'eutrophisation, la salinité et les matières toxiques. Certains travaux sur ce sujet ont été déjà effectués par **Steinberg et Schiefele (1988)** en Allemagne. L'indice trophique diatomées (ITD) au Royaume-Uni (**Kelly et Whitton, 1995**); un indice, appelé également indice trophique diatomées, en Allemagne (**Coring et al., 1999**); et l'indice Trophique (IT) en Autriche (**Rott et al., 1999**). Une mesure distincte pour évaluer la pollution organique (saprobie) appelée l'indice saprobique (IS) a été développée à côté de la IT (**Rott et al., 1997**). À peu près au même moment, l'Indice biologique diatomique (IBD) a été développé en France centré sur les effets biologiques et la pollution saline, l'IBD avait une base de calcul plus sophistiqué que l'IPS, avec une taxonomie simplifiée (**Lenoir et Coste, 1996**). Selon **Blanco et Bécares (2010)**.

La figure 7 montre un schéma d'une vue d'ensemble de l'évolution des paramètres fondés sur les diatomées pour évaluer la qualité de l'eau en Europe depuis 1980 (**Kelly et al., 2009**). Dont tous les indices biotiques indiqués sont brièvement décrits dans le tableau 7.



**Figure 7** : Schéma d'une vue d'ensemble de l'évolution des indices fondés sur les diatomées pour évaluer la qualité de l'eau en Europe depuis 1980, (**Kelly et al., 2009**).

**UWWTD** : Directive de traitement des eaux usées urbaines,

**WFD** : Directive-cadre de l'eau.

**Tableau 7** : Liste des indices de diatomées (Blanco et Bécars, 2010)

Indice de diatomée	Description	Références
<b>ADPI</b> : Indice de diatomées d'Artois-picardie	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961) ; 45 espèces et 91 genres utilisées	<b>Prygiel <i>et al.</i>, (1996)</b>
<b>CEE</b> : Indice européen	Basé sur une grille de qualité; 208 espèces communes utilisées	<b>Descy et Coste (1991)</b>
<b>DAIpo</b> : Indice assemblage de diatomées pour la pollution organique	Classifie les taxons suivant la tolérance à la pollution (BOD5); 226 taxons utilisés	<b>Watanabe <i>et al.</i>, (1986)</b>
<b>DES</b> : Indice de Descy	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); 106 espèces communes utilisées	<b>Descy (1979)</b>
<b>DI-CH</b> : Indice de diatomées Suisse	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); 106 espèces communes utilisées	<b>Hurlimann et Niederhauser (2006)</b>
<b>EPI-D</b> : Indice de pollution d'eutrophisation	La sensibilité de l'espèce est un index intégré allant de 0 à 4, tandis que les scores de fiabilité varie de 1 à 5	<b>Dell'Uomo (2004)</b>
<b>IBD</b> : Indice biologique diatomées	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); 209 espèces communes utilisées	<b>Lenoir et Coste (1996)</b>
<b>IDG</b> : Indice de diatomées générique	Nécessite la détermination au niveau genre; Tous les genres d'eau douce utilisés	<b>Rumeau et Coste (1988)</b>
<b>LMA</b> : Indice de Leclercq et Maquet	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); 210 espèces communes utilisées	<b>Leclercq et Maquet (1987)</b>
<b>LOBO</b> : Indice de Lobo	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); 239 espèces communes utilisées	<b>Lobo <i>et al.</i>, (2004)</b>
<b>IDP</b> : Indice de diatomées de Pampean	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); 210 espèces communes utilisées	<b>Gomez et Licursi (2001)</b>
<b>SHE</b> : Indice de Steinberg et Schiefele	utilise 386 espèces groupées en sept assemblages par état trophique et la résistance à la pollution	<b>Steinberg et Schiefele (1988)</b>
<b>SID</b> : Indice de saprobie de Rott	Mesure le statut saprobie de l'eau; 650 espèces communes utilisées	<b>Rott <i>et al.</i>, (1997)</b>
<b>SLA</b> : Indice de Sladeček	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); 323 espèces utilisées	<b>Sladeček (1986)</b>
<b>IPS</b> : Indice de pollution spécifique	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961); Toutes les espèces de l'eau douce utilisées.	<b>Cemagref (1982)</b>
<b>ITD</b> : Indice de diatomées Trophique	Basé sur la formule de Zelinka et Marvan (1961) ; désigné pour détecter l'eutrophisation	<b>Kelly et Whitton (1995)</b>
<b>TID</b> : Indice trophique de Rott	Mesure le statut trophique de l'eau 650 espèces communes utilisées	<b>Rott <i>et al.</i>, (1999)</b>

### 3.6. Réponses structurelles et fonctionnelles

Les réponses structurelles et fonctionnelles des assemblages de diatomées ont également été utilisées comme indicateurs des conditions environnementales des systèmes aquatiques (**Stevenson et Pan, 1999**). La structure des communautés de diatomées dans les rivières peut être affectée par des changements de la qualité de l'eau tels que des niveaux élevés d'éléments nutritifs produits chimiques inorganiques et organiques dans les ressources naturelles. Les changements dans la composition des espèces sont généralement les réponses les plus sensibles des diatomées aux changements environnementaux (**Gold et al., 2002**). La sensibilité spécifique des communautés de diatomées aux modifications de l'environnement peut se refléter dans les changements de l'abondance relative des espèces dans les communautés. Les changements dans la composition des espèces exposées à des polluants ont tendance à diminuer ou à augmenter le nombre d'espèces sensibles ou tolérantes (**Ivorra, 2000; Gold et al., 2002**).

Trois approches, comme les indices d'ordination, de regroupement et de similarité communautaire, sont souvent utilisées pour évaluer la variation de la composition des espèces entre les communautés (**Stevenson et Pan, 1999**). Les indices de structure communautaire (diversité, richesse, similarité) ont été largement utilisés pour surveiller les effets de la pollution ponctuelle sur les cours d'eau (**Hill et al., 2000**). L'indice de diversité (diversité de Shannon-Wiener) a été utilisé comme indicateur de l'évolution de la structure communautaire en situation de stress environnemental (**Sabater, 2000**). L'indice de diversité semble être réduit par la pollution métallique (**Foster, 1982**). La relation proposée entre la diversité et le stress environnemental n'a pas toujours été confirmée (**Stevenson, 1984**), mais elle semble mieux convenir à la pollution par les métaux (**Sabater, 2000; Gold et al., 2002**) où la diversité diminue avec la concentration croissante des métaux. La tolérance communautaire induite par la pollution (PICT) a été proposée pour détecter l'impact des substances toxiques dans l'environnement sur le périphyton naturel et pour identifier les agents responsables de l'impact (**Blanck et Wängberg, 1988**). Le concept PICT est basé sur le fait que les communautés sont composées des espèces ayant une sensibilité différente aux polluants. En cas d'exposition à long terme aux substances toxiques, les espèces sensibles seront exclues et la communauté restructurée qui en résultera deviendra plus tolérante.

La tolérance croissante peut donc être considérée comme un indicateur de perturbation de l'environnement sur la communauté. PICT a été validé avec des expériences de microcosmes contrôlés soumis à des contraintes métalliques (**Gustavson et Wängberg 1995; Paulsson et al., 2000 Soldo et Behra, 2000**). La structure physique du périphyton peut également être liée à la sensibilité ou à la tolérance des communautés de diatomées aux facteurs de stress environnementaux (**Barranguet et al., 2000**). Les communautés de diatomées peuvent s'adapter à de nombreux stress

environnementaux en changeant la composition des espèces et ainsi atteindre la biomasse et le taux métabolique comme ceux des zones non touchées. Des changements dans la structure et les activités métaboliques sont également utilisés pour déterminer les effets des rejets des eaux usées traitées sur les communautés périphytiques (**Masseret et al., 1998**). La photosynthèse et la respiration peuvent être utilisées comme mesures de la productivité et de la santé de la collectivité (**Barranguet et al., 2000; Guasch et al., 2003**); cependant, ces essais ne sont pas fréquemment utilisés sur le terrain (**Stevenson et Pan, 1999**).

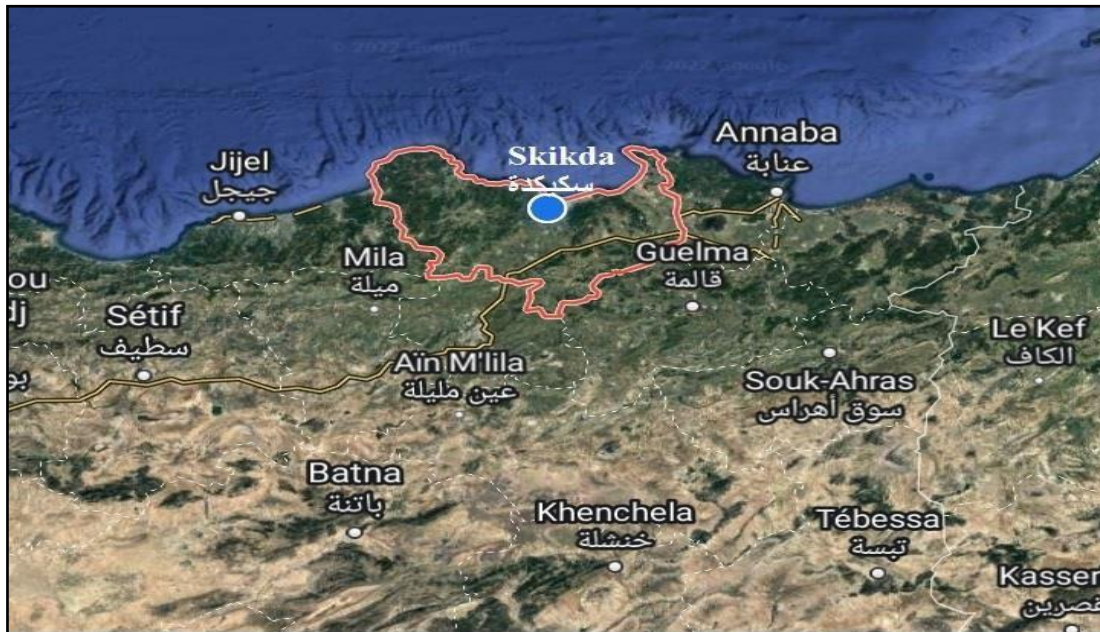
Ces critères sont utilisés pour évaluer la réponse de la périphyte des communautés aux substances toxiques dans plusieurs études. **Hill et al., (1997)** ont utilisé la réponse du taux de respiration du périphyton à titre expérimental pour déterminer l'impact dans l'habitat. Le taux de croissance (**Stevenson, 1996**) a été utilisé pour décrire la production de biomasse algale. D'autre part, taux de croissance spécifique relatif La limitation par les éléments nutritifs a été mesurée à l'aide de la chlorophylle a été suggéré d'être un outil utile pour déterminer les effets des rejets de sources ponctuelles (**Biggs, 1990**). Toutes les évaluations des différentes réponses des taux de croissance des espèces aux diverses conditions environnementales peuvent être améliorées par la simple caractérisation de l'autoécologie des espèces en fonction des changements dans leur abondance relative (**Stevenson et Pan, 1999**).

*Chapitre II*  
*Matériel et Méthodes*

## Chapitre II: Matériels et méthode :

### 1. Présentation de la zone d'étude :

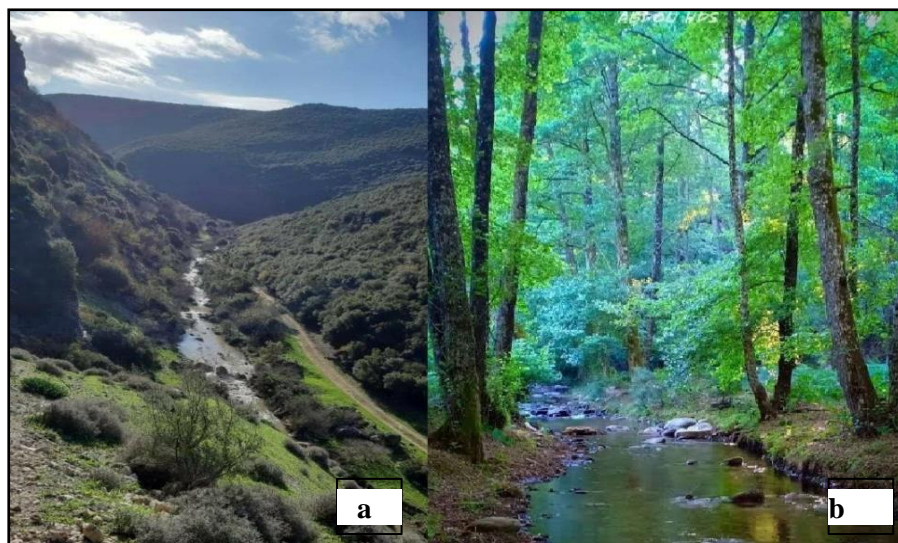
La wilaya de Skikda est une ville algérienne située au nord-est algérien, dans le Nord-Constantinois sur sa façade maritime; 36° 45' 0" N / 6° 49' 60" E. Elle est entourée de cinq wilayas limitrophes Annaba, Guelma, Constantine, Mila et Jijel (Fig.8). Dont de nombreux cours d'eaux traversent la wilaya : Oued Guenitra avec 125 millions de m<sup>3</sup>, Oued Zit Emba avec 120 million m<sup>3</sup>, Oued Beni Zid avec 50 millions de m<sup>3</sup> et Oued Zerdazas avec 20 million de m<sup>3</sup> (ANPE ; 1994).



**Figure 8 :** Position géographique de la wilaya de SKIKDA (google map).

#### 1.1. Site d'échantillonnage :

Nous avons réalisé la collecte des diatomées benthiques dans deux communes différentes, au niveau d'Oued El Oueldja à la commune de Collo et au niveau d'Oued Bou Kerachef à la commune d'Oum Toub. Dont les deux sites d'échantillonnage Oued El Oueldja et Oued Bou Kerachef sont non pollués Au niveau du point d'échantillonnage par ce que il n'y a aucun rejet déversé dans les deux sites (Fig. 9).



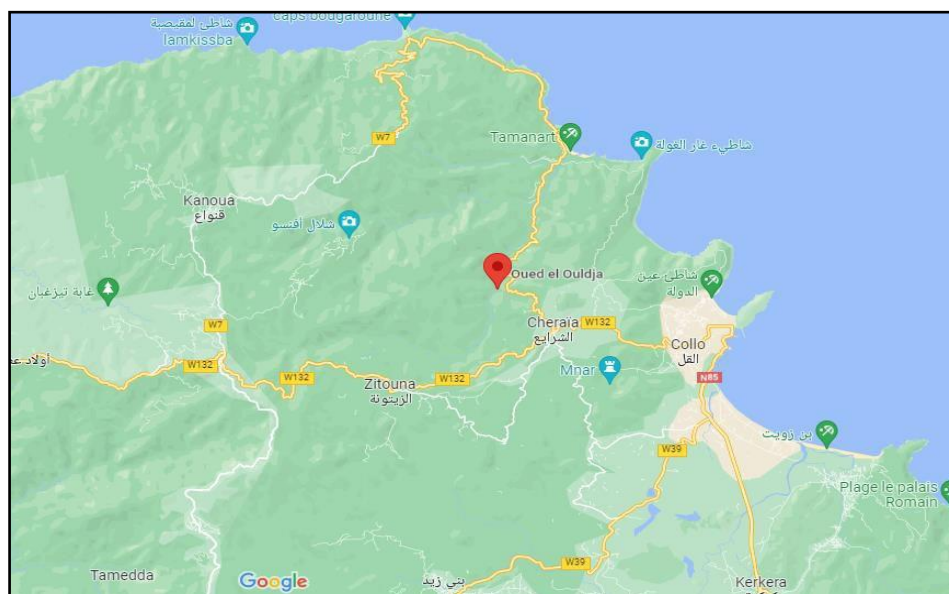
**Figure 09:** Site d'échantillonnage, (a) Oued Bou Kerachef, (b) Oued El Oueldja

## 1.2 Principales caractéristiques des Oueds BOU-KERACHEF et EL-OUELDJA :

### 1.2.1. Géographie :

#### a. Oued El Oueldja :

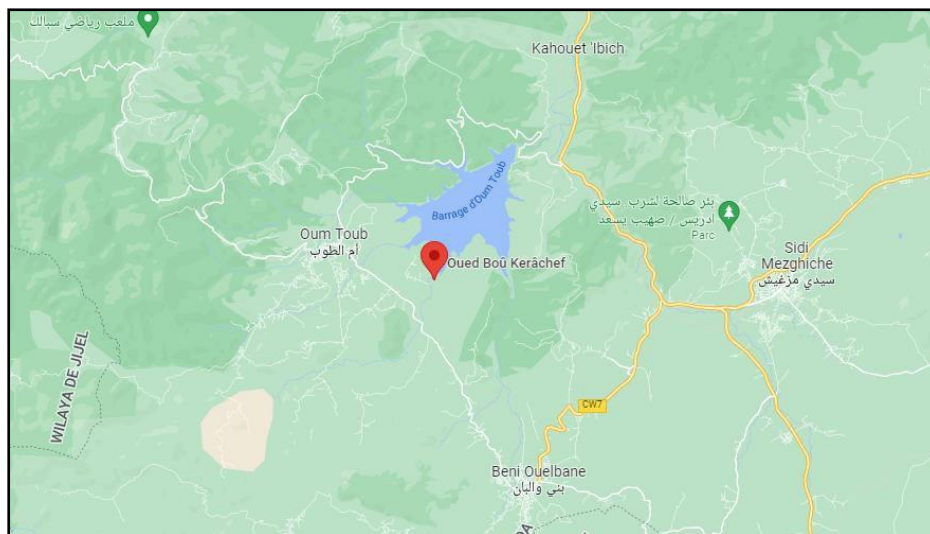
Il est situé à  $37.015^{\circ}$ - $37^{\circ} 0' 54''$ N /  $6.4994^{\circ}$ - $6^{\circ} 29' 58''$  E algérien et au nord-ouest de la wilaya de Skikda a la commune de Collo à proximité de Zribet Belkassem et proche de Oued Bousnane. Il s'étend jusqu'à la plage de Tamanart (Fig.10).



**Figure 10 :** Position géographique d'Oued El Oueldja (google Maps)

#### b. Oued Bou kerachef :

Il est situé à  $36.6794^{\circ}$ N /  $6.7207^{\circ}$ E algérien et au sud-ouest de la wilaya de Skikda à la cammune d'Oum Toub. Cet oued se ramifie d'Oued Guenitra (Fig.11).



**Figure 11** : Position géographique d'Oued Bou Kerachef (google Maps)

### **1.2.2. Météorologie :**

Skikda a un climat méditerranéen, qui se caractérise par des hivers chauds et pluvieux et des étés chauds et secs. La période des précipitations commence d'octobre à mars. La période d'équinoxe et de sécheresse commence d'avril à septembre. L'état reçoit une quantité importante de pluie, avec une précipitation annuelle estimée à 730 mm. Les environs de Skikda sont également affectés en termes de température, selon ses différentes régions. Par exemple, on constate que la région nord-ouest (Collo où se trouve oued El Ouedja) reçoit une grande quantité de précipitations en raison de la présence d'une végétation abondante (forêts de liège...) et sa température est moyenne là où il y a une brise fraîche. Quant au sud-ouest de la wilaya (région d'Oum Toub où se trouve Oued Bou Kerachef) Nous parcourons 55 Km. Nous constatons que le climat est tempéré en raison de la présence d'un couvert végétal dense, et la température est modérée, caractérisée par un climat tempéré (**site officiel de la wilaya de Skikda**).

## **2. Objectif de l'étude :**

Notre objectif dans ce mémoire était de faire une étude comparative sur l'état de santé de deux cours d'eaux (Oued El Ouldja et Oued Bou Kerachef), en étudiant leurs qualités en analysant des microorganismes lotiques : les diatomées.

## **3. Analyse des communautés des diatomées :**

### **3.1. Prélèvement des échantillons :**

Nous avons prélevé les échantillons afin de les analyser au laboratoire. Quelques paramètres physicochimiques de l'eau ont été étudiés. L'analyse de la flore diatomique porte sur un aspect qualitatif et quantitatif. Les prélèvements se sont effectués pendant les périodes d'étiage dans les deux sites. Les diatomées benthiques ou périphytiques se trouvent attachées à des supports

naturels ou artificiels. Les supports naturels tels que : galets, roches, plantes, macroalgues, etc., sont immergés dans l'eau.

**a. Méthode de prélèvement d'échantillon :**

Pour le prélèvement des échantillons, nous avons utilisé le matériel suivant :

- Récipient
- Brosse

Notre échantillonnage est réalisé selon les étapes suivantes :

D'abord on prélève un galet relativement gros immergé dans l'eau qui contient une couche de biofilm et associe une forte abondance de diatomée. Le galet est placé dans un récipient et on frotte la surface par une brosse afin de récolter tout le biofilm brun contenant les diatomées et on verse de l'eau pour faciliter le nettoyage du support, le tout est récupéré dans un récipient qui sera collecté au laboratoire (Fig.12).



**Figure 12:** Méthode d'échantillonnage des diatomées

**3.2. Analyses qualitative :**

**3.2.1. Préparation des diatomées :**

Les diatomées benthiques (périphytiques) ont été collectées dans des flacons séparés et conservés sur le terrain au formol neutralisé (proportion de 10%), après élimination de la fraction sur thoma, le culot a été traité à l'eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 30%) bouillante pendant 10 minutes pour dégrader la matière organique et pendant 5 minutes par l'acide chlorhydrique

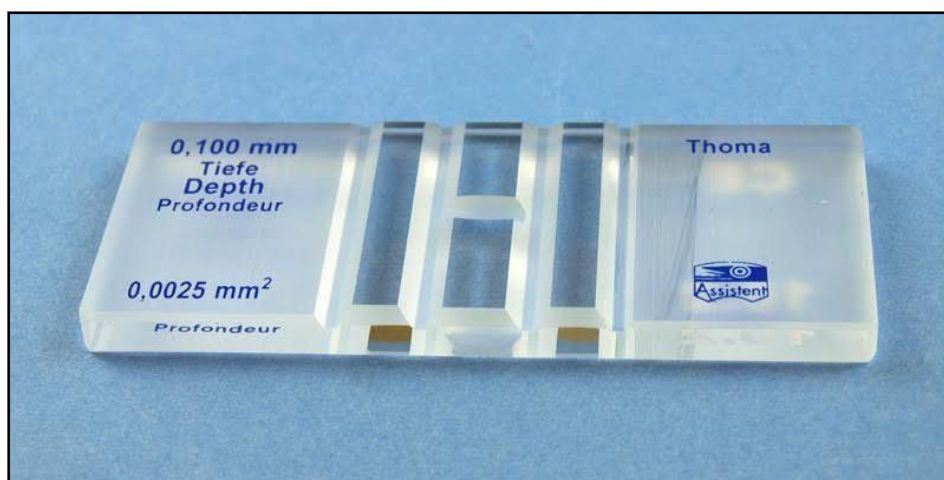
bouillant (HCL, 35%) ; les échantillons ont été soumis ensuite à une succession de centrifugations (3 min à 3000 tours) et de nettoyages avec de l'eau distillée. Une partie d'aliquote de l'échantillon nettoyé a été déposée sur une lamelle, déshydratée par séchage. (Prygel, 2000).

### 3.2.2. Identification :

Les diatomées dans les échantillons nettoyés et montés ont été identifiées au niveau de l'espèce à l'aide de la microscopie Le OPTIKA avec grossissement 40x. La détermination était fondée sur leurs caractéristiques morphologiques uniques, stables. Sur chaque lame jusqu'à 400 valves de diatomées ont été identifiées et comptées. Le guide (Les Diatomées des eaux douces) a été utilisé comme base d'identification et complété avec une bibliographie plus récente. Pour l'inventaire des diatomées, un indice de diatomées IDG (Indice de diatomées générique) (Rumeau et Cost 1988) a été calculé pour évaluer la qualité de l'eau.

### 3.3. Analyses quantitative :

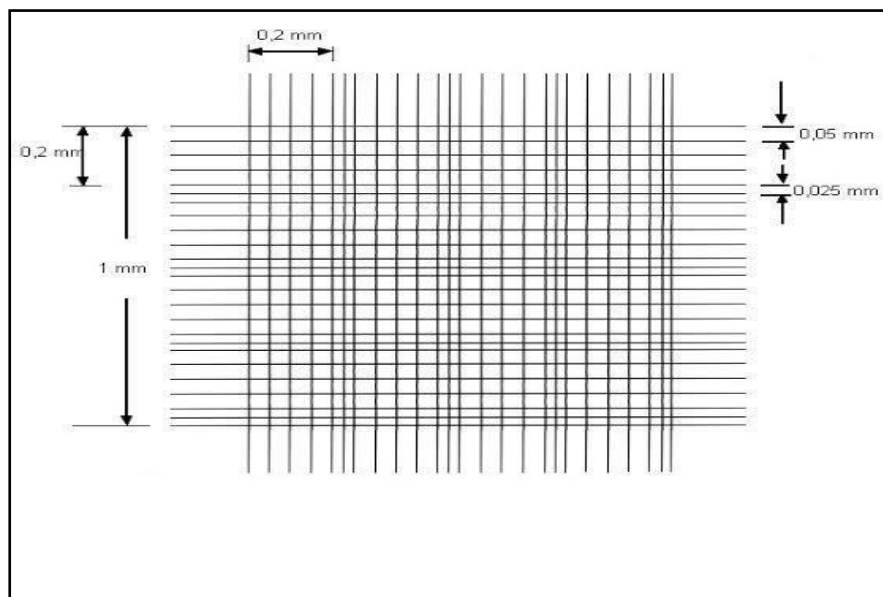
Des échantillons de diatomées périphtiques ont été conservés dans une solution de formol (5 %) avant de dénombrer le nombre de cellules par unité de surface. Le comptage a été effectué à l'aide d'une chambre de comptage Thoma (Fig.13).



**Figure 13 :** La cellule de Thoma

La cellule de Thoma est constituée d'une lame de verre épaisse qui porte à sa partie supérieure un réseau de lignes gravées perpendiculairement et qui délimitent 400 carrées, dont le quadrillage total est représenté dans la figure 14 avec des caractéristiques suivantes :

- ▶ Volume : 0,1  $\mu$ l
- ▶ Côté : 1 mm
- ▶ Hauteur (ou profondeur) : 0,1 mm
  - 16 grands carrés contenant chacun 16 petits carrés
  - + 4 groupes de 3 lignes horizontales + 4 groupes de 3 lignes verticales.
- ▶ Côté de chaque petit carré : 0,05 mm
- ▶ Volume délimité par 1 petit carré : 0,00025  $\mu$ l
- ▶ Volume délimité par 16 petits carrés : 0,004  $\mu$ l



**Figure 14 :** Quadrillage de la cellule Thoma

- **Calcul des espèces sous microscope**

Le nombre total de cellules a été déterminé par numération sous observation microscopique à deux objectifs (X10, X40) :

- **Observation à l'objectif  $\times 10$**  pour repérer la position du quadrillage et vérifier l'homogénéité de la répartition des cellules à compter.

- **Observation à l'objectif  $\times 40$**  pour effectuer le comptage des espèces de diatomées (objectif à une profondeur de champ spécialement augmentée).

Le calcul de nombre d'éléments cellulaires est par microlitre selon la formule suivante:

Avec :

$$N = n / V$$

**n** = le nombre d'éléments comptés,

**N** = le nombre d'éléments par microlitre ( $\mu$ l),

**V** = le volume de comptage.  $V = 0,1 \mu$ l (totalité du quadrillage)

Si le comptage est effectué sur du liquide dilué : ne pas oublier de multiplier le nombre d'éléments comptés par le taux de dilution.

### 3.4. Calcul des indices écologiques :

Pour l'étude écologique des diatomées de la région en question, nous avons calculé différents paramètres et indices diatomiques. Ces indices sont les plus utilisés à l'heure actuelle et permettent de fournir des informations nécessaires sur les communautés de diatomées ainsi que sur la répartition dans le milieu. Nous présentons ces indices dans ce qui suit.

#### 3.4.1. Indice de Shannon-Weaver :

Cet indice est défini comme étant la probabilité d'occurrence d'un événement et calculé selon la formule suivante :

$$H' = -\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

$P_i$  : la fréquence relative de l'espèce ou  $P_i = n_i / N$

$n_i$  : nombre d'individus d'une espèce donnée.

$N$  : nombre total d'individus.

$H$  tend vers 0 : tous les individus du peuplement appartiennent à une seule et même espèce, L'indice est maximal quand tous les individus sont repartis d'une façon égale pour toutes les espèces (Ramade, 1984)

#### 3.4.2. Indice de Simpson :

L'indice de Simpson mesure la probabilité que deux individus sélectionnés appartiennent à la même espèce calculé selon la formule suivante :

$$D = \sum (n_i - 1) / N (N - 1)$$

$n_i$  : nombre d'individus de l'espèce donnée.

$N$  : nombre total d'individus.

$D = 0$  indique le maximum de diversité.

$D = 1$  indique le minimum de diversité.

#### 3.4.3. L'indice de Hill :

$$\text{Hill} = 1/D / e^{H'}$$

Il s'agit d'une mesure de l'abondance proportionnelle, permettant d'associer les indices de Shannon-Weaver et de Simpson :

$1/D$  : L'inverse de l'indice de Simpson.

$e^{H'}$  : L'exponentiel de l'indice de Shannon-Weaver.

L'indice de diversité de Hill permet d'obtenir une meilleure interprétation de la diversité observée (Hill, 1973).

#### 3.4.4. L'équitabilité :

L'indice d'équitabilité représente le rapport de l'indice de Shannon-Weaver  $H'$  à l'indice maximal théorique dans le peuplement ( $H'_{max}$ ).

$$E = \frac{H'}{H'_{max}}$$

Avec :

$H'_{max} = Ln(S)$

$Ln$  = logarithme a base 2

$S$  : la richesse spécifique

Cet indice peut varier entre 0 et 1, il est maximal lorsque chaque espèce est représentée par le même nombre d'individus, et il est minimal quand le quasi totalité des effectifs correspond à une seule espèce du peuplement (**Ramade, 1984**).

#### 3.5. Calcul de l'indice diatomique de la Qualité de l'Eau :

La plupart des indices de diatomées sont basés sur la moyenne pondérée de l'équation **Zelinka-Marvan (1961)**. Issue du système saprobique (ou à un ou plusieurs paramètres chimiques) qui prend en compte l'abondance des taxons, la sensibilité à la pollution et la valeur indicatrice. L'équation **Zelinka-Marvan (1961)** est la suivante :

$$ID = \frac{\sum_{j=1}^n A_j I_j V_j}{\sum_{j=1}^n A_j V_j}$$

Avec :

$A_j$  = Abondance (proportion) de l'espèce  $j$  dans l'échantillon

$V_j$  = Valeur de l'indicateur (1-3)

$I_j$  = Sensibilité à la pollution (1-5) de l'espèce  $j$

Les différences entre les indices tiennent au nombre de taxons retenus (espèces et variétés genres, unités taxinomiques), et à la valeur des coefficients de sensibilité et de valeur indicatrice.

##### 3.5.1. L'Indice Diatomique Générique :

L'indice Générique de Diatomée (IDG) permet d'apprécier la qualité de l'eau en se basant sur le calcul générique (genres des diatomées) (**Coste et Rumeau, 1982**). Dont la formule de calcul est la suivante :

$$IDG = \frac{\sum_{j=1}^n A_j V_j i_j}{\sum_{j=1}^n A_j V_j}$$

En regard de chaque taxon une valeur de sensibilité globale (**i**) variant de 1 à 5 et une valeur (**v**) variant de 1 à 3 représentant le degré de "sténocécie" d'autant plus élevée que la distribution est restreinte. Il suffit d'effectuer la somme des produits de l'abondance (**A**) de chaque taxon (exprimé en %) par ces deux valeurs ( $\sum i.v.A$ ) et de diviser le total obtenu par la somme ( $\sum v.A$ ) pour obtenir un indice générique global variant entre 1 et 5.

Cette note peut être transformée d'une note N variant de 1 à 5 à une note Q variant de 1 à 20 en utilisant la formule suivante:  $Q = N \times 4,75 - 3,75$  afin de classer la qualité des eaux selon le tableau 08.

**Tableau 08** : Valeurs de l'indice diatomique indiquant les différentes classes de qualité de l'eau (De la Rey *et al.*, 2004).

Classes de qualité de l'eau	Valeur d'indice
Supérieure	> 17
Bonne	15 - 17
Moyenne	12-14.9
Médiocre	9 – 11,9
Mauvaise	< 9

Pour l'exploitation statistique des résultats, nous avons utilisé la méthode manuelle (calcul en Microsoft Office Excel 2007).

Le tableau 09 liste des taxons susceptibles d'être rencontrés ou utilisés dans notre étude :

**Tableau 09:** Genres utilisés pour le calcul de l'indice diatomique  
(Rumeau et Coste, 1988).

TAXONS	i	v	TAXONS	i	v
<i>Achnanthes</i>	5	1	<i>Gyrosigma</i>	4	3
<i>Amphipleura</i>	5	3	<i>Hantzschia</i>	1	3
<i>Amphora</i>	3	2	<i>Melosira</i>	3	1
<i>Anomoeoneis</i>	5	2	<i>Meridion</i>	5	2
<i>Asterionella</i>	4	1	<i>Navicula otthostichae</i>	2	2
<i>Attheya</i>	2	3	<i>Navicula punctatae mutica</i>	1	2
<i>Caloneis</i>	4	2	<i>Navicula (autres)</i>	3	1
<i>Campylodiscus</i>	5	2	<i>Neidium</i>	4	3
<i>Ceratoneis (Hannaea)</i>	5	2	<i>Nitzschia dissipatae</i>	4	2
<i>Cocconeis</i>	4	1	<i>Nitzschia (autres)</i>	1	1
<i>Cyclotella</i>	3	1	<i>Pinnularia</i>	4	3
<i>Cymatopleura</i>	4	2	<i>Rhizosolenia</i>	2	3
<i>Cymbella</i>	5	1	<i>Rhoicosphenia</i>	4	1
<i>Denticula</i>	5	3	<i>Rhopalodia</i>	5	3
<i>Diatoma</i>	4	1	<i>Stauroneis</i>	5	2
<i>Diploneis</i>	6	1	<i>Stenopterobia</i>	5	3
<i>Epithemia</i>	5	2	<i>Stephanodiscus</i>	2	1
<i>Eunotia</i>	5	1	<i>Surirella</i>	3	3
<i>Fragilaria</i>	4	1	<i>Synedra</i>	3	1
<i>Frustulia</i>	5	2	<i>Tabellaria</i>	5	1
<i>Gomphoneis</i>	4	2	<i>Tetracycius</i>	5	3
<i>Gomphonema</i>	3	2	<i>Thalassiosira</i>	2	3

*Chapitre III*  
*Résultats et Discussion*

### Chapitre III: Résultats et discussion :

#### 1. Résultats microscopique et interprétation des deux Oueds :

Après l'observation microscopique et l'identification nous sommes sortis avec ces résultats :

##### 1.1.Oued El Oueldja :

Dans ce site d'échantillonnage nous avons identifiées 30 taxons (Fig.15), dispersé avec des pourcentages variable de moins dominantes aux plus dominantes dont les genres les plus fréquents sont : *Amphiplera pollucida* avec 6.203%, *Berkeleya sp* et *Bacillaria paradoxa* avec 5.955% et *Naviculaerifuga* avec 5.459% (Fig.16).

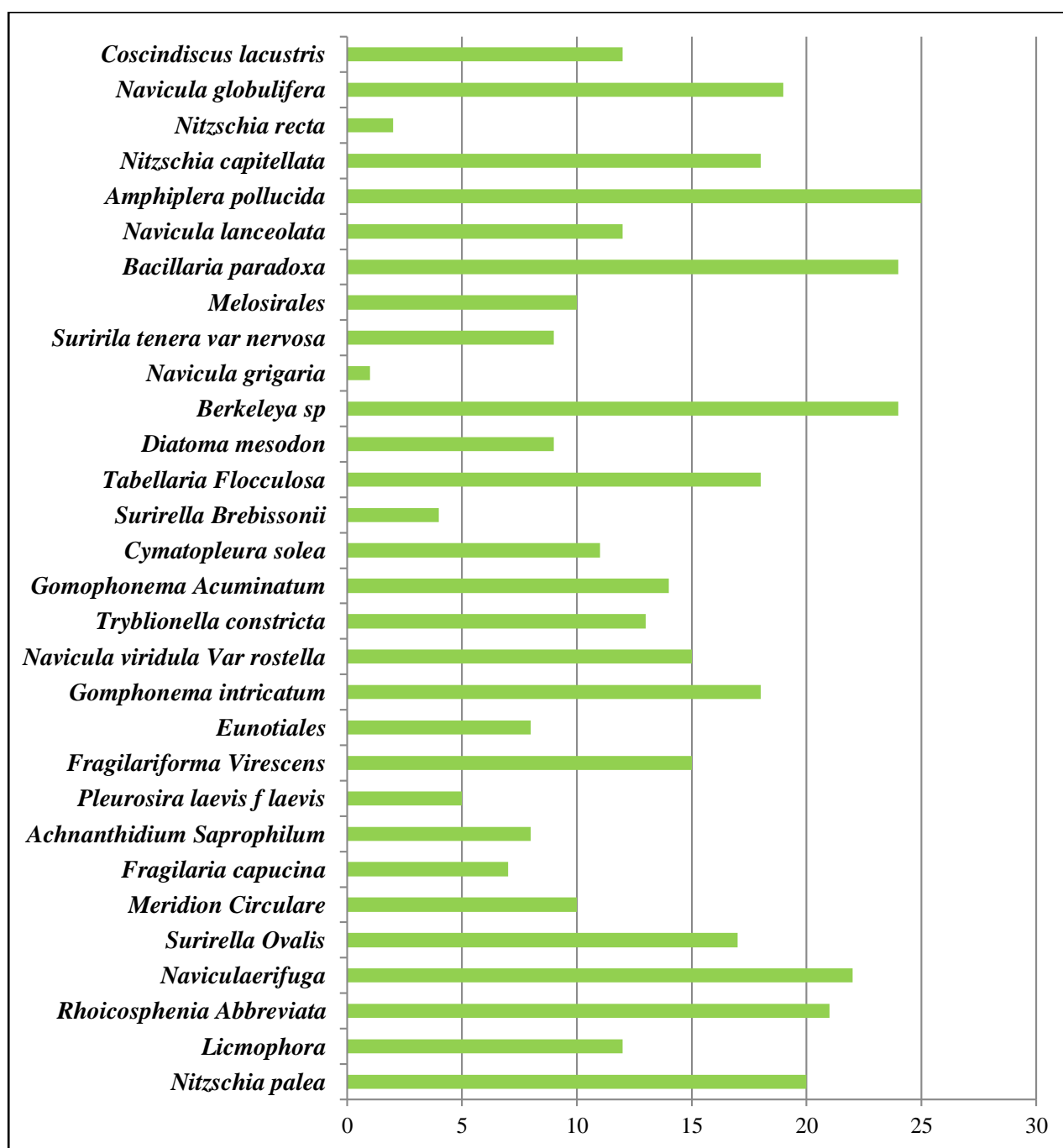
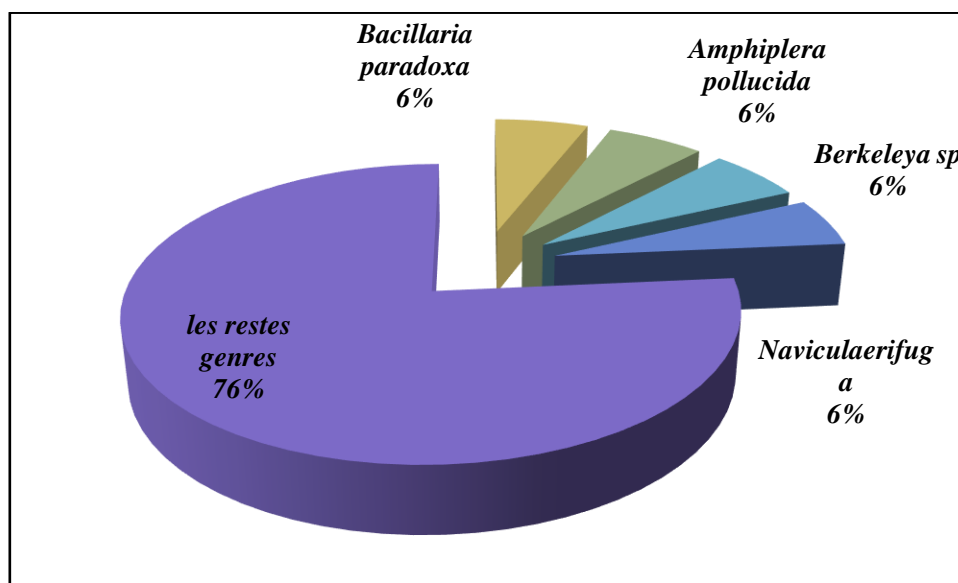
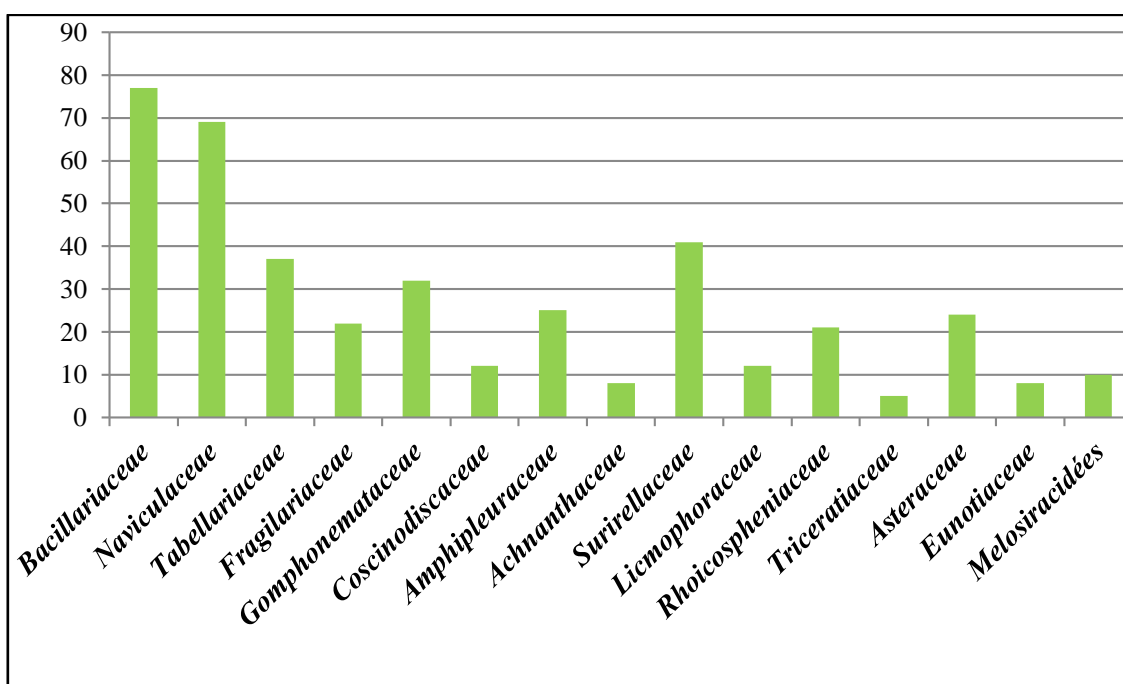


Figure 15 : Fréquences des genres identifiés dans Oued El Oueldja

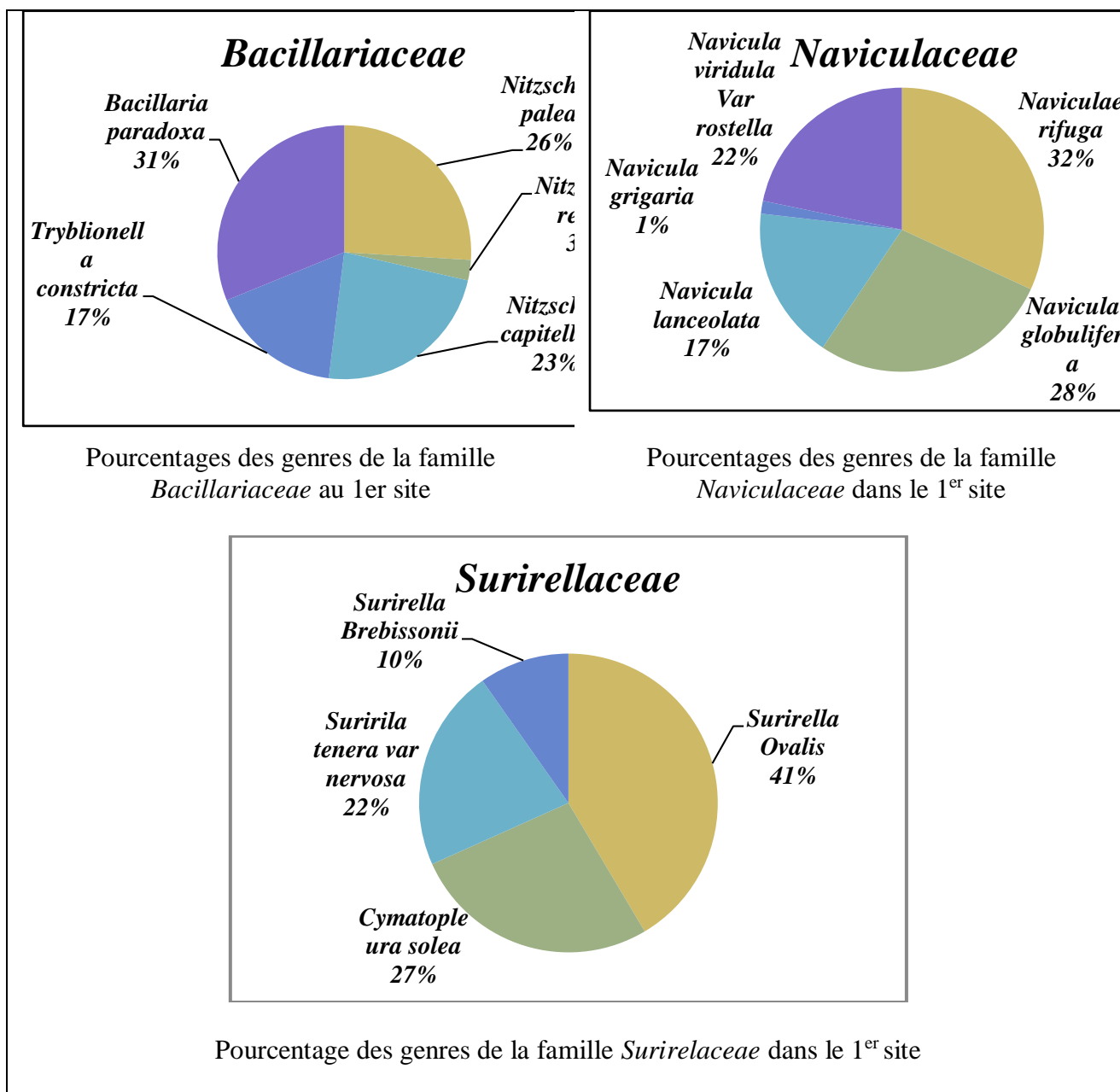


**Figure 16 :** Pourcentages des genres les plus abondantes dans Oued El Oueldja

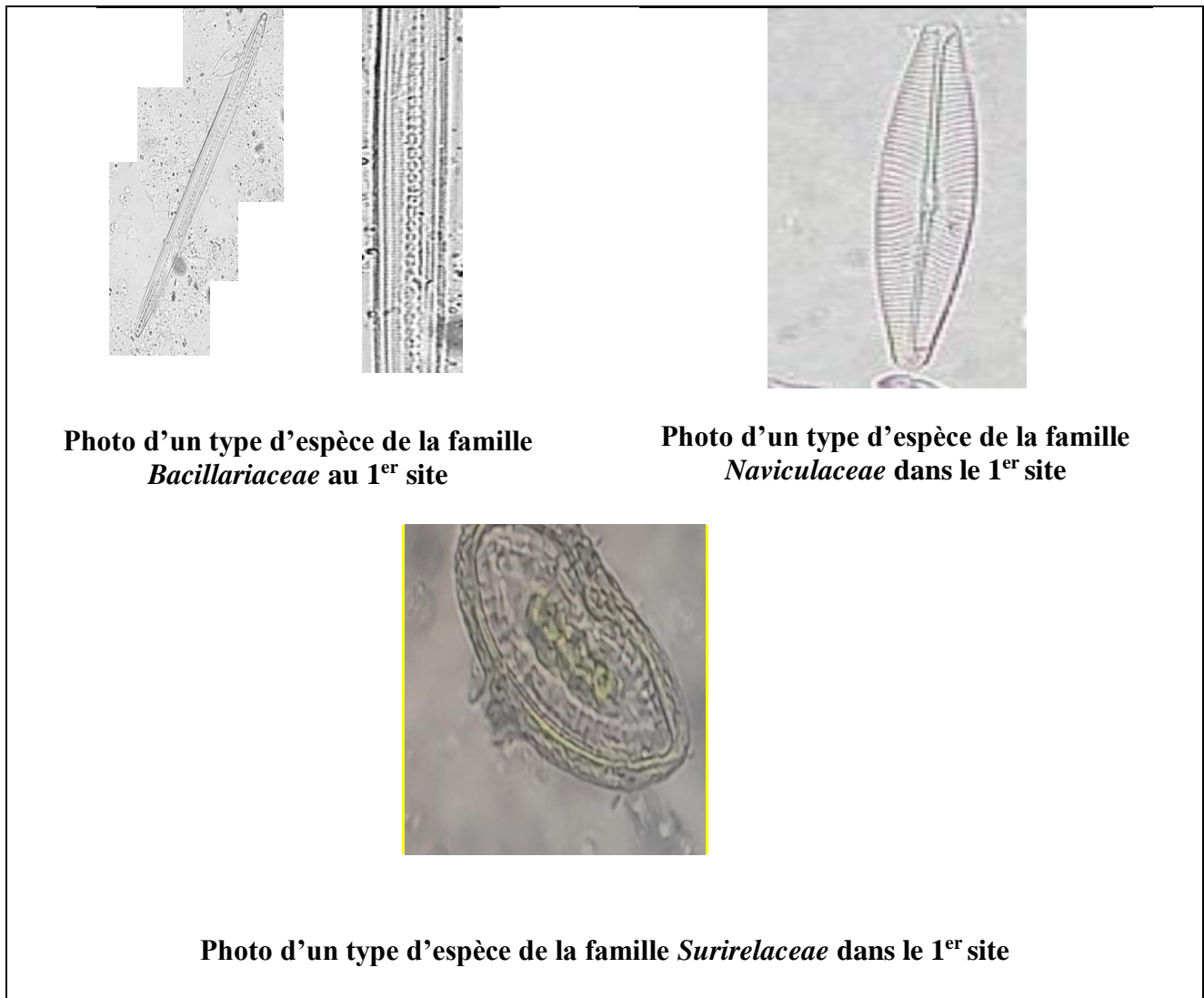
D'après ces résultats nous avons identifiée 13 familles (Fig.17), dont les familles les plus abondantes sont : *Bacillariaceae* à plus de 19% où les genres représentatifs de cette famille sont *Bacillaria paradoxa*, *Nitzschia palea*, *Nitzschia capitellata*. *Naviculaceae* à plus de 17% où les genres les plus fréquents sont *Naviculaerifuga*, *Navicula globulifera*. Aussi la famille *Surirellaceae* à plus de 10% où le genre représentatif est *Surirella Ovalis* (Fig.18). Les 10 autres familles identifiants ont des pourcentages varient de 1 jusqu'à 10%. La figure 19 représente des photos des genres représentatives des dominances familles dans ce site d'échantillonnage.



**Figure 17 :** Fréquence des familles existant dans Oued El Oueldja



**Figure 18** : Différents genres des trois familles les plus représentatives dans le 1<sup>er</sup> site



**Figure 19** : Photos des genres représentatives des familles abondantes dans le 1<sup>er</sup> site

• Ces résultats ont montré une diversité de communautés structurales de diatomées dans ce site d'échantillonnage et ont aussi montré les groupes des familles représentatifs de cet Oued avec *Bacillariaceae*, *Naviculaceae* et *Surirellaceae* et les genres représentatifs de chaque famille dominante dans cet Oued.

### 1.2. Oued Bou Kerachef :

Dans ce site d'échantillonnage nous avons identifiées 20 taxons (Fig.20) dont les genres les plus fréquents dans ce site sont *Surirella ovalis* avec 8%, *Amphileura Pellucida* et *Nitzschia Recta* et *Navicula Capitoratiata* avec 7%, , *Nitzschia intermedia* et *Eunotiales* avec 6% (Fig.21).

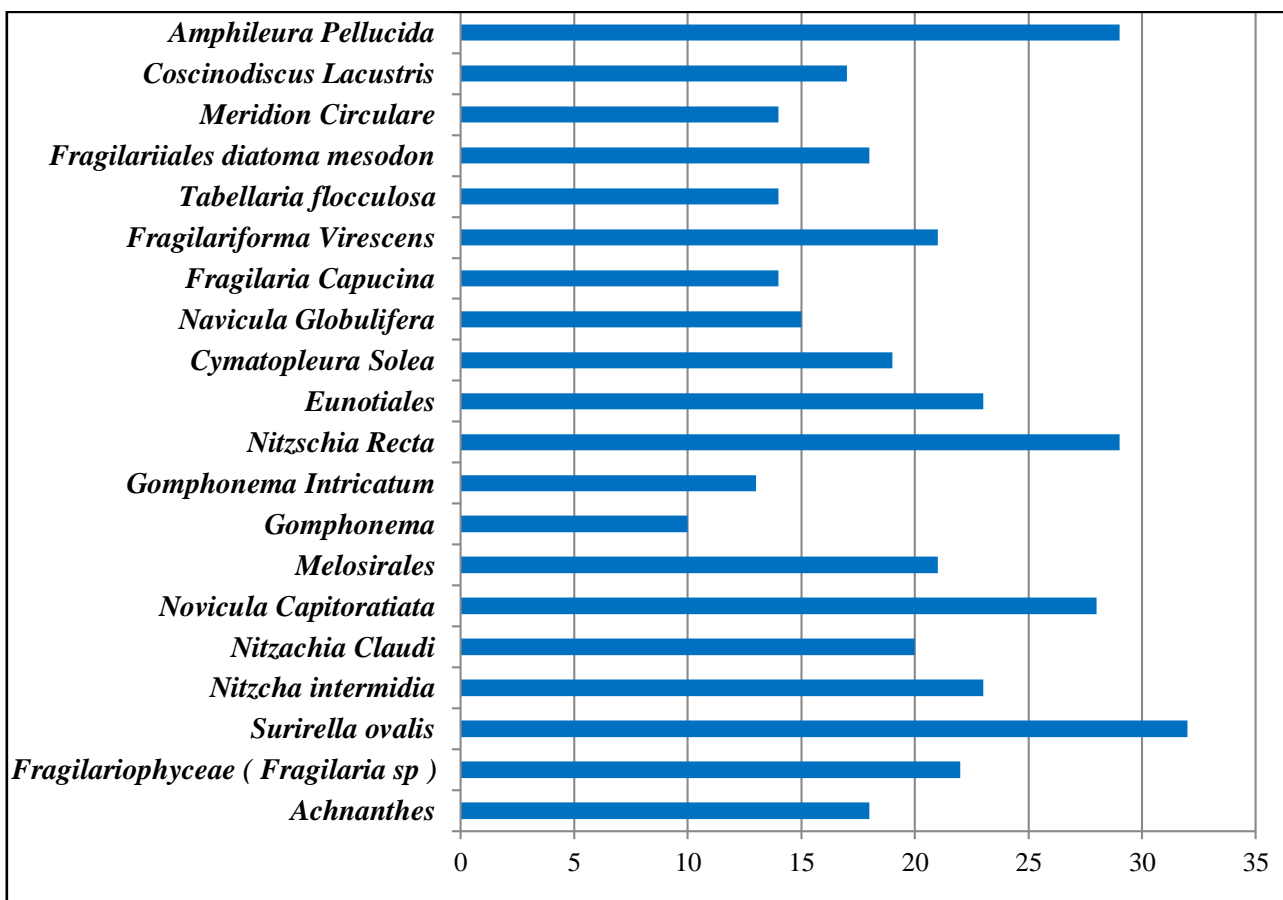
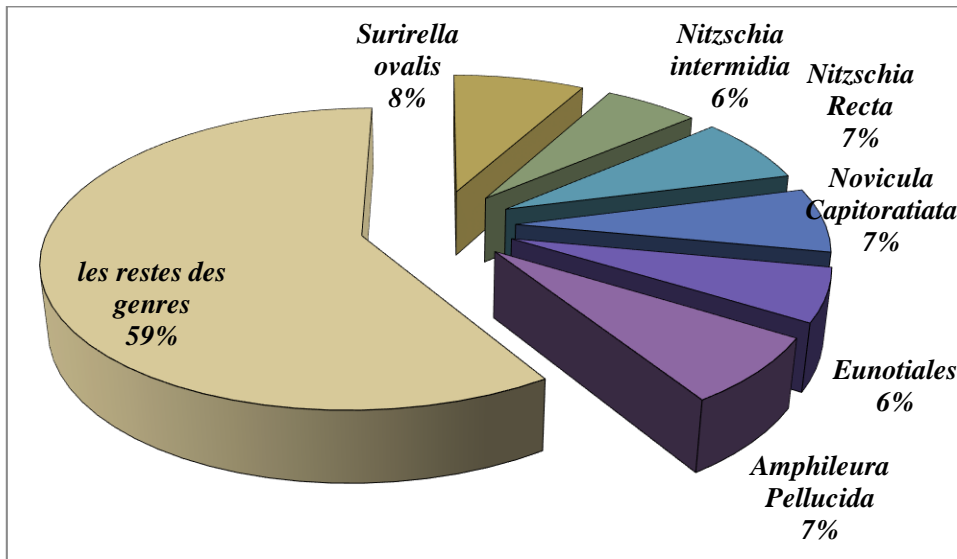
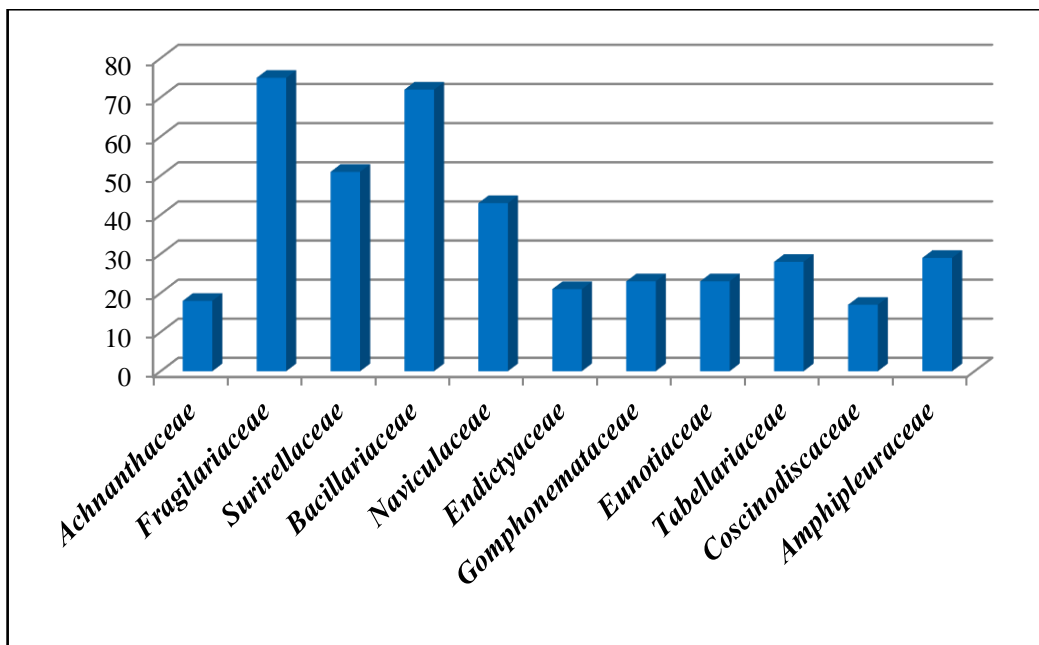


Figure 20 : Fréquences des genres identifiées dans Oued Bou Kerachef

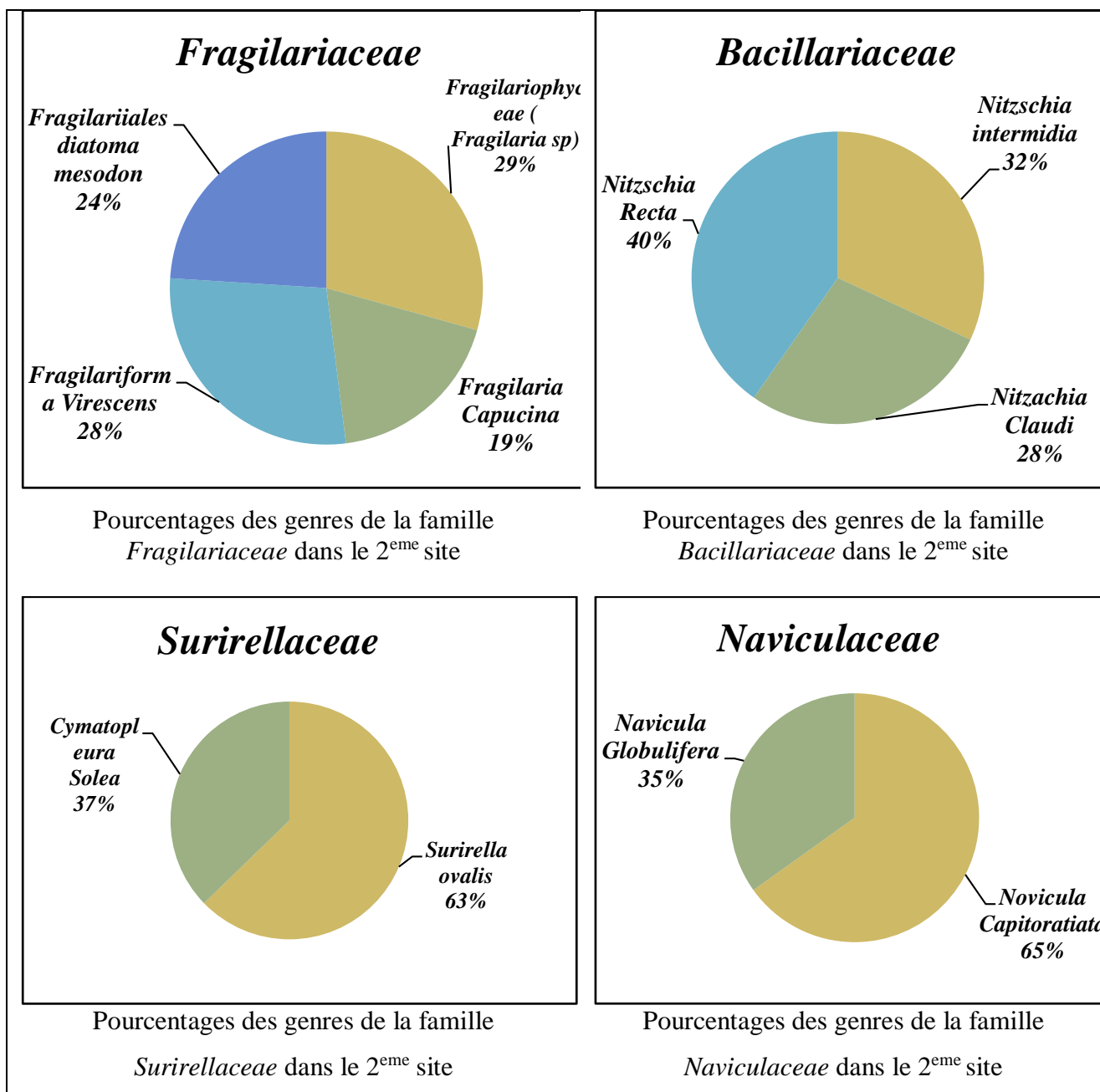


**Figure 21 :** Pourcentages des genres les plus abondantes dans le 2eme site.

D'après ces résultats Nous avons identifiées 11 familles (Fig.22), dont nous avons remarqué la dominance des familles : *Fragilariaceae* à plus de 18% où les genres représentatifs sont *Fragilariophyceae* (*Fragilaria sp*), *Fragilariforma Virescens* et *Fragilariiales diatoma mesodon*. La famille de *Bacillariaceae* à 18% représenté par les genres : *Nitzschia Recta*, *Nitzschia intermedia* et *Nitzschia Claudi*. La famille de *Surirellaceae* à plus de 12% représenté par les genres *Surirella ovalis* et *Cymatopleura Solea* et la famille *Naviculaceae* représenté par *Navicula Capitoratiata* (Fig.23). Aussi nous avons identifiées 7 autres familles avec un pourcentage variant entre 4 et 11%. La figure 24 représente des photos des genres représentatives des dominances familles dans ce site d'échantillonnage.



**Figure 22 :** Fréquences des familles existantes dans le 2<sup>eme</sup> site



**Figure 23** : Différents genres des quatre familles les plus représentatives dans le 1<sup>er</sup> site.

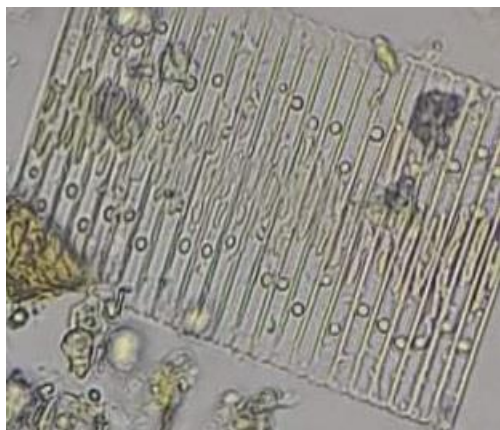


Photo d'un type d'espèce de la famille *Fragilariaceae* dans le 2<sup>ème</sup> site



Photo d'un type d'espèce de la famille *Bacillariaceae* dans le 2<sup>ème</sup> site



Photo d'un type d'espèce de la famille *Surirellaceae* dans le 2<sup>ème</sup> site



Photo d'un type d'espèce de la famille *Naviculaceae* dans le 2<sup>ème</sup> site

**Figure 24** : Photos des genres représentatives des familles abondantes du 2<sup>ème</sup> site.

Ces résultats ont montré une diversité de communautés structurales de diatomées dans ce site d'échantillonnage et ont aussi montré les groupes des familles représentatifs de cet Oued qui sont : *Bacillariaceae*, *Surirellaceae*, *Naviculaceae* et *Fragilariaceae* et les genres représentatifs de chaque famille dominante dans cet Oued.

## 2. Résultats microscopique comparatives entre les deux Oueds et l'interprétation :

Après l'observation microscopique et l'identification nous avons identifiés 16 familles des diatomées dispersées dans les deux sites d'échantillonnages (Fig.25), où 10 familles sont communes entre les deux sites avec des pourcentages différents : *Bacillariaceae*, *Naviculaceae*, *Tabellariaceae*, *Fragilariaceae*, *Gomphonemataceae*, *Coscinodiscaceae*, *Amphipleuraceae*, *Achnanthaceae*, *Surirellaceae* et *Eunotiaceae*. En outre les familles *Licmophoraceae*, *Rhoicospheniaceae*, *Triceratiaceae*, *Asteraceae* et *Melosiracidées* étions identifiées uniquement dans Oued El Ouedja, de l'autre coté la famille *Endictyaceae* était identifiée uniquement dans Oued Bou kerachef (Fig.26).

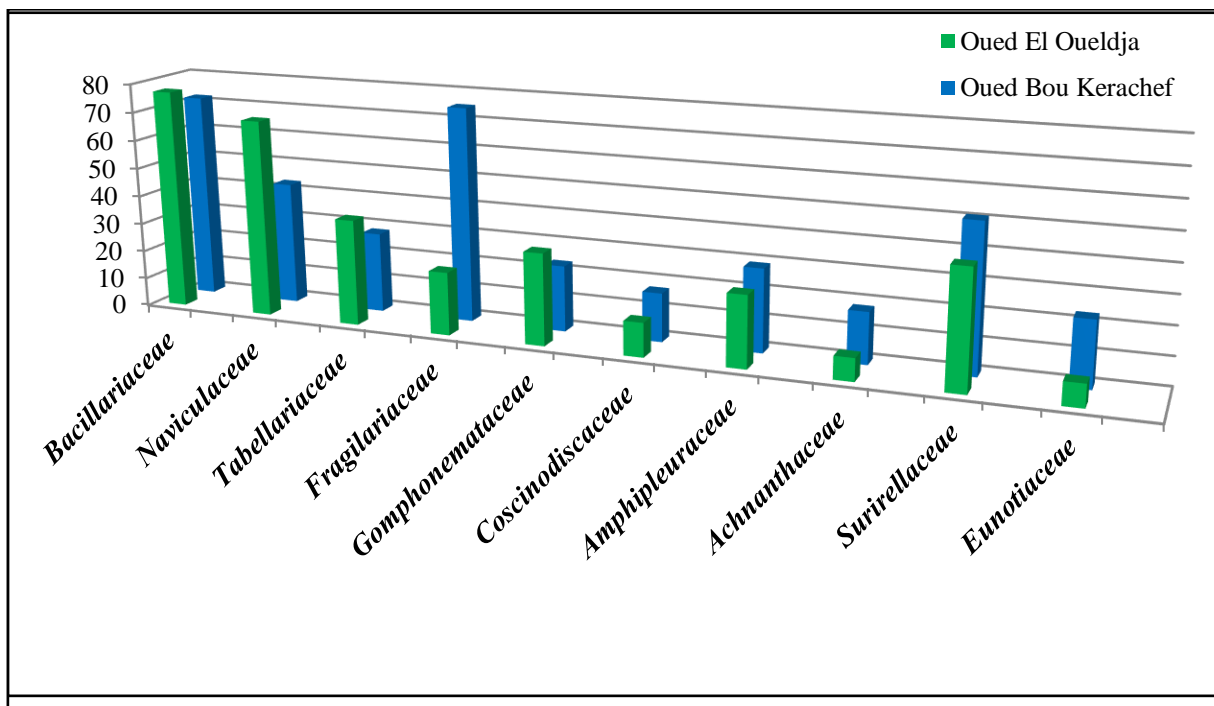
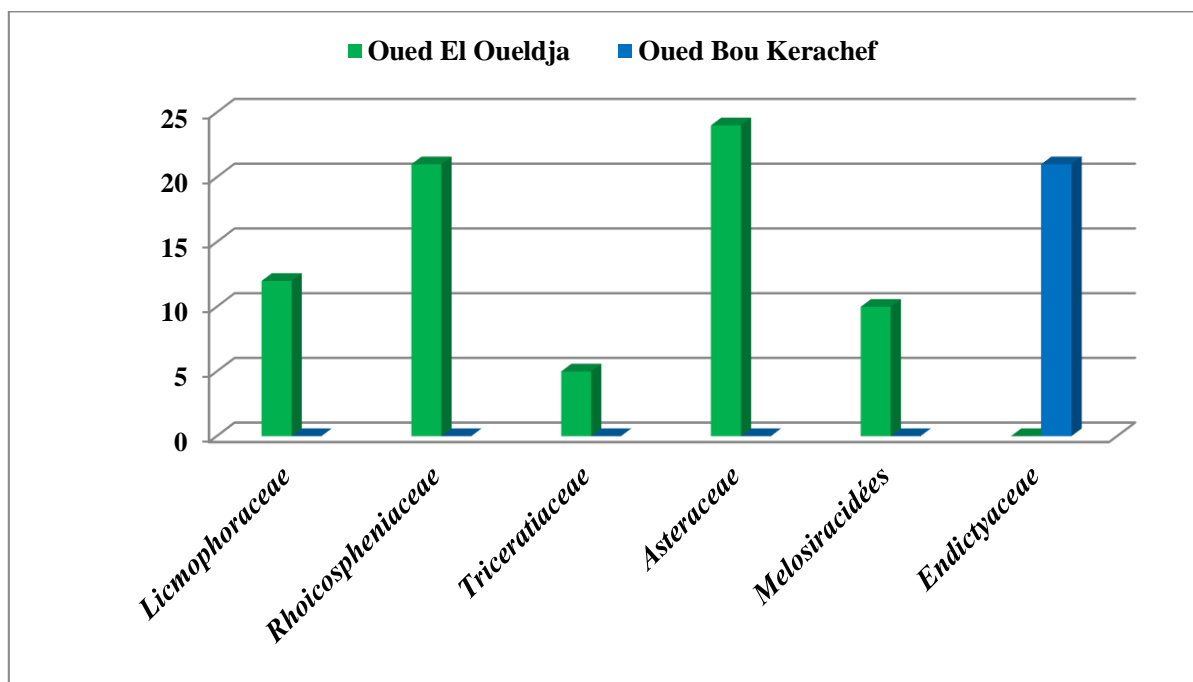


Figure 25 : Fréquences des familles communes entre les deux Oueds



**Figure 26 :** Fréquences des familles distinctives aux deux Oueds

D'après ces résultats comparatives entre les deux Oueds, la différence en les familles dominantes dans chaque site est claire, sa peut être une significatif de la diversité des diatomées dans les cours d'eaux. La variation en les pourcentages de présence des diatomées aussi peut estimées diversité de ces microalgues benthiques dans chaque cour d'eau.

### 3. Les indices écologiques :

Les résultats de cette partie sont étudiés par des indices écologiques, il s'agit de l'indice de diversité de Shannon Waever, l'indice de Simpson, l'indice de Hill et l'indice d'équitabilité entre les espèces.

#### 3.1.Oued El Ouedja :

Les résultats des calculs de ces indices écologique dans le 1<sup>er</sup> site d'échantillonnage sont présentés dans le tableau10.

**Tableau 10 :** Résultats du calcul des indices écologique dans le 1<sup>er</sup> site.

Les indices écologiques	H'	D	Indice de Hill	E
Oued El Ouedja	3.27	0.959	0.925	0.545

L'indice de diversité de Shannon-Waever dans cet Oued est :  $H' = 3.27$ . Cette valeur est inférieur à la diversité maximale  $H'_{max}$  qui est égale à 5.999 ce qui signifie que la population des diatomées dans cet Oued est très peu diversifiée. La valeur de l'équitabilité de 0.545 quêtés varié entre la valeur maximale et la valeur minimale dans il indique que la population est très peu diversé et que n'est pas 'une seule espèce domine tout le peuplement.

Les valeurs de chacun des deux indices de Simpson  $D = 0.959$  et de Hill  $= 0.925$  montrent et confirment que le peuplement des diatomées est peu diversifié dans cet Oued.

### 3.2.Oued Bou Kerachef :

Les résultats des calculs de ces indices écologiques dans le 1<sup>er</sup> site d'échantillonnage sont présentés dans le tableau 11.

**Tableau 11** : Résultats du calcul des indices écologiques dans le 2<sup>eme</sup> site.

Les indices écologiques	H'	D	Indice de Hill	E
Oued Bou Kerachef	2.953	0.946	0.961	0.493

L'indice de diversité de Shannon-Waever dans cet Oued est :  $H' = 2.953$ . Cette valeur est inférieure à la diversité maximale  $H'_{max}$  qui est égale à 5.991 ce qui signifie que la population des diatomées dans cet Oued est très peu diversifiée. La valeur de l'équitabilité de 0.493 qu'est varié entre la valeur maximale et la valeur minimale dans il indique que la population est très peu diversé et que n'a pas une seule espèce domine tout le peuplement.

Les valeurs de chacun des deux indices de Simpson  $D = 0.946$  et de Hill  $= 0.961$  montrent et confirment que le peuplement des diatomées est peu diversifié dans cet Oued.

Les résultats des ces indices écologiques sont presque identiques dans les deux Oueds mais plus spécifiquement Oued El Oueldja est plus déversées que Oued Bou Kerachef

### 4. L'indice diatomique Générique (IDG) :

L'indice IDG est basé sur une résolution taxonomique faible (calcul de l'indice porte sur les genres de diatomées) cela ne permet pas de donner des résultats fiables pour la qualité de l'eau mais il est utile pour avoir un aperçu général. les résultats de calcul de l'IDG sont présentés dans le tableau 12.


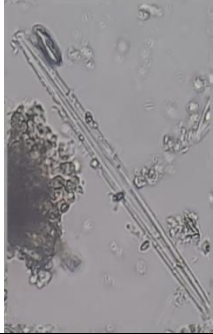
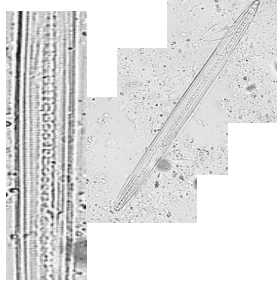


**Tableau 12** : Résultats du calcul de l'IDG dans les deux Oueds


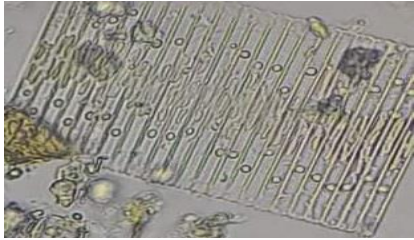


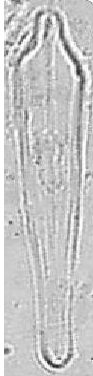
	Oued El Oueldja	Oued Bou Kerachef
IDG	12.314	13.179



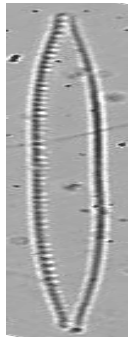

Selon le tableau 08 (Valeurs de l'indice diatomique indiquant les différentes classes de qualité de l'eau (De la Rey *et al.*, 2004). Les deux oueds ont une valeur entre 12-14.9 ce qui indique une moyenne qualité de l'eau.



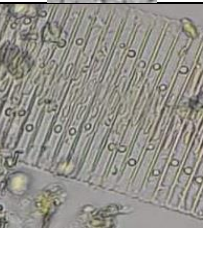


Le Tableau 13 présente les photos des diatomées qui sont identifiées dans les deux Oueds :

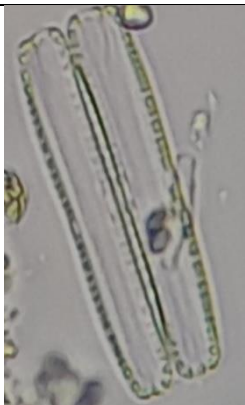
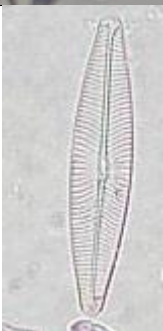


**Tableau 13** : Quelques Diatomées de la région d'étude observées sous microscope optique




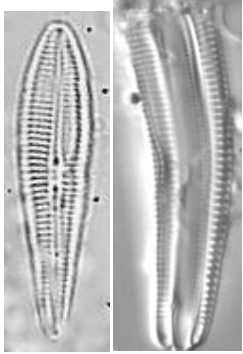


Photos	Taxon	Tailles
	<b>Achnanthes</b>	Long.(um) : 29 Larg.(um) : 8 Stria/10um :14
	<b>Amphiplera pollucida</b>	Long.(um) : 85 Larg.(um) : 7.5 Stria/10um :40
	<b>Bacillaria paradoxa</b>	Long.(um) : 106 Larg.(um) :6.8 Stria/10 um : 22 Fibules/10um : 6
	<b>Berkeleya Sp</b>	Long.(um) : 17.3 Larg.(um) : 3 Stria/10um :36
	<b>Diatoma mesodon</b>	Long.(um) : 12 Larg.(um) : 14

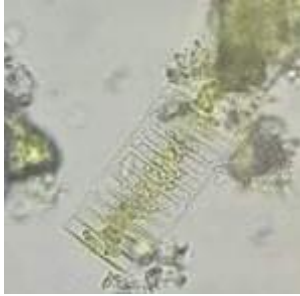




	<p><b>Eunotiales</b></p>	<p>Long.(um) :102 Larg.(um) :4.2 Stria/10 um : 16</p>
	<p><b>Fragilaria capucina</b></p>	<p>Long.(um) : 63 Larg.(um) : 4 Stria/10um :13.5</p>
	<p><b>Fragilariforma Virescens</b></p>	<p>Long.(um) :15_60 Larg.(um) :7 Stria/10 um : 22</p>
	<p><b>Gomphonema Intricatum</b></p>	<p>Long.(um) :34.4 Larg.(um) :7.8 Stria/10 um : 12</p>
	<p><b>Licmophora</b></p>	<p>Long.(um) :42.3 Larg.(um) :7.5</p>

	<p><b>Melosirales</b></p>	<p>Long.(um) :30_81 Larg.(um) :28_47 Stria/10 um : 16</p>
	<p><b>Nitzschia capitellata</b></p>	<p>Long.(Um) :9 Larg.(Um) :4 Fibules/10um :22</p>
	<p><b>Nitzschia Palea</b></p>	<p>Long.(Um) :55 Larg.(Um) :5 Fibules/10um :12</p>
	<p><b>Surirella Brebissonii</b></p>	<p>Long.(Um) : 21 Larg.(Um) : 11.4 Stria/10um :9</p>

			<p><b>Navicula globulifera</b></p>	<p>Long.(Um) : 51 Larg.(Um) : 8 Stria/10um :13</p>
			<p><b>Navicula grigaria</b></p>	<p>Long.(Um) : 27.5 Larg.(Um) : 7.4 Stria/10um :16</p>
			<p><b>Fragilari ophyceae ( Fragilaria sp )</b></p>	<p>Long.(Um) :50 Larg.(Um) :20 Stria/10 Um : 8</p>
			<p><b>Fragilariforma Virescens</b></p>	<p>Long.(Um) : 13.5 Larg.(Um) : 4 Stria/10um :18</p>
			<p><b>Fragilariiales diatoma mesodon</b></p>	<p>Long.(Um) :10_40 Larg.(Um) :12 Stria/10 Um : 35</p>

	<p><b>Gomphonema</b></p>	<p>Long.(Um) :92 Larg.(Um) :15 Stria/10 Um : 12</p>
	<p><b>Navicula erifuga</b></p>	<p>Long.(Um) :36 Larg.(Um) :7 Stria/10 Um : 14</p>
	<p><b>Nitzaschia recta</b></p>	<p>Long. (Um) :96 Larg. (Um) :5 Fibules/10um : 8</p>
	<p><b>Nitzcha intermedia</b></p>	<p>Longueur(Um) : 58 Largeur (Um) : 4 Fibules/ 10 Um : 9</p>

	<p><b>Surirella Ovalis</b></p>	<p>Long.(Um) :52 Larg.(Um) :27 Stria/10 Um : 16 Fibules/10um : 5et 6</p>
	<p><b>Surirella ternera var. nervosa</b></p>	<p>Long. (Um) :100 Larg. (Um) :25 Fibules/10um : 2et 3</p>
	<p><b>Tryblionella constricta</b></p>	<p>Long.(Um) :47 Larg.(Um) :7 Stria/10 Um :17</p>
	<p><b>Rhoicosphenia Abbreviata</b></p>	<p>Long.(Um) : 21 Larg.(Um) : 6 Stria/10um :13</p>
	<p><b>Navicula viridula Var rostella</b></p>	<p>Long.(Um) : 38.7 Larg.(Um) : 9.5 Stria/10um :15</p>
	<p><b>Coscindiscus lacustris</b></p>	<p>Diamètres (Um) : 29</p>

	<p><b>Tabellaria Flocculosa</b></p>	<p>Long.(Um) : 33 Larg.(Um) : 18</p>
	<p><b>Achnantheidium Saphophilum</b></p>	<p>Long.(Um) :9 Larg.(Um) :4 Stria/10um :22</p>
	<p><b>Cymatopleura solea</b></p>	<p>Long.(Um) : 68 Larg.(Um) : 19</p>
	<p><b>Navicula lanceolata</b></p>	<p>Long.(Um) : 41 Larg.(Um) : 8.5 Stria/10um : 16</p>
	<p><b>Gomophonema Acuminatum</b></p>	<p>Long.(Um) : 48 Larg.(Um) : 12 Stria/10um :12</p>



*Conclusion*

## Conclusion

Les eaux de surface en dans le monde évoluent à la fois en qualité (chimique et biologique) et en quantité. La plupart des travaux sur la caractérisation de la qualité de l'eau de nos systèmes hydrologiques se sont concentrés sur les paramètres physicochimiques et les macroinvertébrés avec peu de travaux sur les algues, en particulier les diatomées.

Nous avons effectué des travaux sur l'écologie des diatomées et l'utilisation de ces micro-organismes comme bio-indicateurs de la qualité de l'eau. Nous avons effectué des prélèvements dans la région de Skikda (Oued El Oueldja et Oued Bou Kerachef) en employant certains indicateurs environnementaux afin de calculer l'indice général des diatomées (IDG) et des indices écologiques comme : indice de Shannon, indice de Simpson et l'indice de Hill afin d'évaluer la qualité d'eau des deux Oueds et la diversité des espèces des communautés des diatomées existant.

Après l'étude, les échantillons d'Oued El Oueldja ont donné ces résultats : indice de Shannon  $H' = 3.27$  et indice Simpson  $D = 0.959$  et l'indice de Hill =  $0.925$  et l'IDG égale à  $12.314$ . Ils ont permis de faire ressortir les familles les plus abondantes : *Bacillariaceae*, *Naviculaceae* et *Surirellaceae*.

Pour l'Oued Bou Kerachef, les résultats obtenus des indices écologiques indice de Shannon  $H' = 2.953$  et indice Simpson  $D = 0.946$  et l'indice de Hill =  $0.961$ , l'IDG égale  $13.179$  à permet de faire sortir les familles les plus représentatives suivantes : *Bacillariaceae*, *Surirellaceae*, *Naviculaceae* et *Fragilariaceae*.

A partir de ses résultats obtenus nous pouvons classé les eaux de l'Oued El Oueldja et Oued Bou Kerachef à la catégorie de qualité moyenne et très peu diversifié au niveau des peuplements des diatomées.

### Perspectives :

Et enfin, d'un point de vue méthodologique et de recherche, nous notons ce qui suit :

- Le logiciel le plus couramment utilisé pour le calcul des indices diatomiques est OMNIDIA un logiciel très utile pour gagner du temps. L'utilisation de ce logiciel nécessite l'étude des paramètres physicochimiques et la nature des eaux et aussi nécessite l'achat d'une licence d'exploitation.

- En matière de microscopie et d'observation des diatomées, il suffit généralement d'utiliser un microscope optique, mais utilisez des résines à indice de réfraction assez élevé, comme la Naphrax (i.f.=1,27) commercialisée exclusivement par la société Brunel Microscopes Ltd

(Londres). Afin d'étudier plus en profondeur l'ultrastructure des frustules de diatomées, la microscopie électronique à balayage est nécessaire, mais l'acquisition et l'utilisation de cet équipement ne sont pas aisées.

- La recherche écologique, notamment la physico-chimie de l'eau, nécessite des équipements et des produits chimiques qui ne sont pas toujours disponibles.

- Actuellement, la recherche sur les diatomées comme indicateurs biologiques de la qualité de l'eau nécessite des études et des expérimentations sur les métaux majeurs comme le mercure et le plomb pour tester la sensibilité de ces organismes à ces éléments.

- Dans les études taxonomiques, l'utilisation de la microscopie électronique est essentielle pour l'identification et la description des espèces.

*Références  
Bibliographiques*

## Références bibliographiques

- Allan, J. D., 1995. Stream ecology structure & function of running waters. Chapman & Hall, 2-6 Boudary Row, London SE1 8HN, 388 pp.
- Anderson N.J., 2000. Diatoms, temperature & climatic change. *European Journal of Phycology*, 35: 307-314.
- ANPE ; 1994, Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement. Monographie de la wilaya de SKIKDA. MATE, 220 pages.
- Atazadeh, I., Sharifi M. & Kelly M.G., 2007. Evaluation of the Trophic Diatom Index for assessing water quality in River Gharasou, Western Iran. *Hydrobiologia*, 589: 165–173.
- Barranguet, C., Charantoni, E., Plans, M., Admiraal, W., 2000. Short-term response of monospecific and natural algal biofilms to copper exposure. *Eur. J. Phycol.* 35, 397-406.
- Barsanti, L., and Paolo Gualtieri. 2014. *Algae: Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*. CRC Press, 361 pp.
- Battarbee, R.W., Smol, J.P., Merilainen, J., 1986. Diatoms as indicators of pH: An historical review. In: Battarbee, R.W., David, R. B., Merilainen (Eds). *Diatoms and Lake acidity*. Dordrecht: Dr. W. Junk. Publ, 5-15.
- Battarbee, R. W., V. J. Jones, R. J. Flower, N. G. Cameron, H. Bennion, L. Carvalho, & S. Juggins., 2001. Diatoms (Pages 155-202) In Smol, J. P., H. J. B. Birks, & W. M. Last, editors. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, & Siliceous Indicators*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Biggs, B. F. J., 1990. Periphyton communities and their environments in New Zealand rivers. *New. Zeal. J. Mar. Fresh.* 24, 367-386.
- Biggs, B. J. F. (1996). "Patterns in benthic algae of streams. In: Stevenson R.J., Bothwell M.L. and Lowe R.L. (eds), *Algal Ecology*. Academic Press, San Diego, pp. 31-56".
- Biggs, B. F. J., 2000. *New Zealand Periphyton guideline: Detecting, Monitoring and Managing enrichment of streams*. Ministry for Environment, INWA, Christchurch, 124 pp.
- Biggs, B. F. J., Hickey, C. W., 1994. Periphyton responses to a hydraulic gradient in a regulated river in New Zealand. *Freshw. Biol.* 32, 49-59.
- Biggs, B.J.F., Goring, D.G., Nikora, V. I., 1998. Subsidy & stress responses of stream periphyton to gradients in water velocity as a function of community growth form. *J. Phycol.* 34, 598-607.
- Blanck, H., Wängberg, S., 1988. Induced community tolerance in marine periphyton established under arsenate stress. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45, 1816-1819.

Blanco, S., Ector, L., Huck, V., Monnier, O., Cauchie, H., Hoffman, L. & Bécares, E., 2008. Diatom assemblages & water quality assessment in the Duero basin .NW Spain. *Belgium Journal of Botany* 141: 39–50.

Burkholder, J. M., 1996. Interactions of benthic algae with their substrata. In: Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. Eds., *Algal ecology of fresh water benthic ecosystems*, Aquatic Ecology Series. Academic Press, Boston, 253-298 pp.

Burn, A., Ryder, D. S., 2001. Potential for biofilms as biological indicators in Australian riverine systems. *Ecol. Manage. Restor.* 2, 53-63.

Carr, G., Morin, A., Chambers, P. A., 2005. Bacteria and algae in stream periphyton along a nutrient gradient. *Freshw. Biol.* 50, 1337-1350.

Cattaneo, A., Couillard, Y., Wunsam, S., Courcelles, M., 2004. Diatom taxonomic and morphological changes as indicators of metal pollution and recovery in Lac Dufault (Québec, Canada). *J. Paleolimnol.* 32, 163-175.

Cazaubon, A. 1991. Problems and objectives of sampling river algae for monitoring. - In: Whitton, B.A., Rott, E. et Friedrich, G. (eds.), *Use of algae for monitoring rivers*. Institut für Botanik, Universität Innsbruck, 17-20.

Cemagref., 1982. Étude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Rapport Technique, Q.E. Lyon A.F., Bassin Rhône-Méditerranée, Corse.

Charles, D.F. et Smol, J.P. 1994. Long-term chemical changes in lakes - Quantitative inferences from biotic remains in the sediment record. - In: *Environmental Chemistry of Land Reservoirs*. Amer Chemical Soc, 3-31.

Chessman, B. C., 1986. Dietary studies of aquatic insects from two Victorian rivers. *Aust. J. Mar. Fresh. Res.* 37, 129-146.

Coring, E., Schneider, S., Hamm, A. & Hofmann, G., 1999. Durchgehendes Trophie system auf der Grundlage der Trophie indikation mit Kieselalgen. Koblenz. Deutscher Verb & für Wasserwirtschaft und Kulturbau.

Coste, M. 'Diatomées invasives exotiques ou rares en France: Principales Observations effectuées au cours des dernières décennies' 2000.

Coste, M et Rumeau, M. 1982. Initiation à la systématique des diatomées d'eau douce pour l'utilisation d'un indice diatomique générique.

De la Rey, P.A., Taylor, J.C., Laas, A., Van Rensburg, L. y Vosloo, A. 2004. Determining the possible application value of diatoms as indicators of general water quality: a comparison with SASS 5. *Water South Africa* 30: 325-332.

De Nicola, D. M., 1996. Periphyton responses to temperature at different ecological level. In: Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. Eds., *Algal ecology of fresh water benthic ecosystem*, Aquatic Ecology Series. Academic Press, Boston, pp. 149-181.

De Stefano, M., De Stefano, L., 2005. Nanostructures in diatom frustules: function and morphology of valvocopulae in Cocconeidacean monoraphid taxa. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 5, 15-24.

Delgado C., Pardo I., Garcia L., 2010. A multimetric diatom index to assess the ecological status of coastal Galician rivers .NW Spain. *Hydrobiologia* 644, 371-384.

Dell' Uomo A. 2004. L'Indice Diatomico di Eutrofizzazione/Polluzione, EPI-D nel monitoraggio delle acque correnti. Linee guida. APAT, Roma.

Derry, L.A., Kurtz, A.C., Ziegler, K. & Chadwick, O.A., 2005. Biological control of terrestrial silica cycling & export fluxes to watersheds. *Nature*, 433, 728-731.

Descy J.P., 1979. A new approach to water quality estimation using diatoms. *Nova Hedwigia*, 64, 305-332.

Descy, J. P., Coste, M., 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Verh. Internat. Limnol.* 24, 2112-2116.

Dixit, S. S., Smol, J. P., Kinston, J. C., Charles, D. F., 1992. Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environ. Sci. Technol.* 26, 23-33.

DU BUF, H., AND BAYER, M. M. Automatic diatom identification. 2002. McFarland, B. H., Hill, B. H., Willingham, W. T., 1997. Abnormal *Fragilaria* spp.(Bacillariophyceae) in streams impacted by mine drainage. *J. Freshwater. Ecol.* 12, 141- 149.

Duong T. T., 2006. Réponses des Diatomées fixées aux pollutions organiques & métalliques dans les hydrosystèmes Nhue-Tolich .Hanoi, Vietnam., & Lot-Riou Mort .France. Thèse de doctorat , Écotoxicologie. Univ. Bordeaux I.

Elster, J., Seckbach, J., Vincent, W.F., Lhotsky, O., 2001. Algae and extreme environments Ecology and Physiology. In : Elster, J., Seckbach, J., Vincent, W. F., Lhotsky, O., (Eds.), *Nova Hedwigia beiheft.* Cramer Berlin Stuttgart, 602 pp.

Feurtet-Mazel, A., Gold, C., Coste, M., Boudou, A., 2003. Study of periphytic diatom communities exposed to metallic contamination through complementary field and laboratory experiments. *J. Phys.* 107, 467-470.

Fisher, N. S., Jones, G. J. 1981. Effects of copper and zinc on growth, morphology, and metabolism of *Asterionella japonica* (Cleve). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 51, 37-55.

Foster, P. L., 1982. Species associations and metal contents of algae from river polluted by heavy metals. *Freshw. Biol.* 12, 17-39.

Gensemer, R., 1900. Role of aluminum and growth rate on changes in cell size and silica content of silica-limited populations of *Asterionella ralfsii* var. *americana* (Bacillariophyceae). *J. Phycol.* 26, 250-258.

Ghosh M., Gaur, J. P., 1998. Current velocity and the establishment of stream algal periphyton communities. *Aquat. Bot.* 60, 1-10.

Gold, C., Feurtet-Mazel, A., Coste M., Boudou, A., 2002. Field transfer of periphytic diatom communities to assess short-term structural effects of metals (Cd,Zn) in rivers. *Wat. Res.* 36, 3654-3664.

Gold, C., Feurtet-Mazel, A., Coste, M., Boudou, A., 2003. Effects of cadmium stress on periphytic diatom communities in indoor artificial streams. *Freshw. Biol.* 48, 316-328.

Gómez N, Licursi M. 2001. The Pampean Diatom Index (IDP) for assessment of rivers and streams in Argentina. *Aquatic Ecology* 35: 173-181. 10.1023.

Guasch, H., Admiraal, W., Sabater, S., 2003. Contrasting effects of organic and inorganic toxicants on freshwater periphyton. *Aquat. Toxicol.* 64, 165-175.

Gustavson, K., Wangberg, S. A., 1995. Tolerance induction and succession in microalgae communities exposed to copper and atrazine. *Aquat. Toxicol.* 32, 283-302.

Håkansson, S., 1993. Numerical methods for the inference of pH variations in mesotrophic & eutrophic lakes in Southern Sweden – A progress report. *Diatom Research*, 8: 349-370.

Helawell, J.M. 1978. Biological surveillance of rivers: a biological monitoring handbook. Water Research Centre, Hertz, 332.

Hellebust, JA & J. Lewin, 1977. Heterotrophic nutrition. In: D. Werner, Ed, *The biology of diatoms*. Blackwell, London, p. 169-197.

Hill, B. H., Herlihy, A. T., Kaufmann, P. R., Stevenson, R. J., McCormick, F. H., Johnson, C. B., 2000. Use of periphyton assemblage data as an index of biotic integrity. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 19, 50-67.

Hill, B. H., Willingham, W. T., Parrish, L. P., McFarland, B. H., 2000. Periphyton community responses to elevated metal concentrations in a Rocky Mountain stream. *Hydrobiologia.* 428, 161-169.

Hill, W. R., 1996. Effects of light. In: Stevenson, R. J., Bothwell, M. L. & Lowe, R. L. [Eds.] *Algal ecology: fresh water benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego, USA, pp. 48-121

Hill, W.R. & Boston, H.L., 1991. Community Development Alters Photosynthesis Irradiance Relations in Stream Periphyton. *Limnology & Oceanography* 36:1375-89.

Hoagland, K. D., Rosowski, J. R., Gretz, M. R., Roemer, S. C., 1993. Diatom extracellular polymeric substances: function, fine structure, chemistry, chemistry and physiology. *J. Phycol.* 29, 537-556.

Hurlimann J, Niederhauser P. 2006. Methoden zur Untersuchung and beurteilung Fließgewässer : Kieselalgen stufe F Bundesamt für Umwelt, BAFU, Bern.

Ivorra, N., 2000. Metal induced succession in benthic diatom consortia. PhD Thesis, University of Amsterdam, 163 pp.

Ivorra, N., Bremer, S., Guasch, H., Kraak, M. H. S., Admiraal, W., 2000. Differences in the sensitivity of benthic microalgae to Zn & Cd regarding biofilm development & exposure history. *Environ. Toxicol. Chem.* 19, 1332-1339.

John, J., 1998. Evaluation of attached diatoms as a tool for riverine bio-assessment of water quality. - LWRDC, 175.

John, J., 1998. Diatom: Tools for bioassessment of river health. University of Technology, Curtin, Western Australia, 388 pp.

John, J., 2000. A guide to diatoms as indicators of urban stream health. - LWRDC, 181.

John, J., 2000 a. A guide to diatoms as indicators of urban stream health. LWRDC, LWRDC Occasional Paper 14/99 (Urban Sub Program, Report No.7), Land and Water Resources Research and Development Corporation Australia, Canberra, 133 pp.

Kahlert, M., 2001. Biomass and nutrient status of benthic algae in lakes. PhD thesis, Acta Universitatis Upsaliensis, 35 pp.

Kelly, M. G., 1998. Use of the trophic diatom index to monitor eutrophication in rivers. *Wateres.* 32, 236 - 242.

Kelly M. G., 2002. Role of benthic diatoms in the implementation of the Urban Wastewater Treatment Directive in the River War, North-East England. *J Appl Phycol* 13.

Kelly M. G. & Whitton B. A., 1995. The trophic diatom index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology*, 7: 433-444.

Kelly M.G., King L. & Ni Chathain B., 2009. The conceptual basis of ecological status assessments using diatoms. *Royal Irish Academy*, 109.3.: 175- 189.

King, L., Barker, P., Jones, R. I., 2000. Epilithic algal communities and their relationship to environmental variables in lakes of the English Lake District. *Freshw. Biol.* 45, 425-442.

Krammer, K., Lange-Betarlot, H., 1986-1991. Bacillariophyceae. 1. Teil: Naviculaceae. 876 p; 2. Teil : Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, 596 p; 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, 576 p; 4. Teil : Achnanthaceae. Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. 437 p. In: H, Ettl., Gerloff, J., Heynig, H., Mollenhauer, D. (Eds.), Süßwasser floravon Mitteleuropa. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 2485 pp.

Lai, S. D., Chen, P. C, Hsu, H. K., 2003. Benthic algae as monitor of heavy metals in various polluted rivers by energy dispersive X-ray spectrometer. *J. Environ. Sci. H.lth*, 38, 855 -866.

Lamberti G.A. & Resh V.h., 1985. Distribution of benthicalgae and macroinvertebrates along a thermal stream gradient. *Hydrobiologia*, 128: 13-21.

Lange-Bertalot, H., 1979. Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. *Nova. Hedwigia.* 64, 285-304.

Lange-Bertalot H., Fumanti B., Cavacini P. & Tagliaventi N., 2009. The genus *Navigiolum*. Bacillariophyceae. in Mediterranean & North African rock pool habitats: description of four new species from Algeria. *Fottea*, 2: 179 -185.

Lavoie I., Hamilton P.B., Campeau S., Grenier M. and Dillon P.J. 2008 Guide d'identification des diatomées des rivières de l'Est du Canada. Presses de l'Université du Québec, Canada, 243 p.

Leclercq L., Maquet B. 1987 Deux nouveaux indices chimiques et diatomiques de qualité d'eau courante. Application au Samson et à ses affluents (Bassin de la Meuse belge). Comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénétiques et diatomiques. Document de travail, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique. Bruxelles, No. 38, 113 p.

Ledger, M. E., Hildrew, A. G., 1998. Temporal and spatial variation in the epilithic biofilm of an acidstream. *Freshw. Biol.* 40, 655- 670.

Lenoir A. & Coste M., 1996. Development of a practical diatom index of overall water quality applicable to the French national water board network. In: B.A. Whitton & E. Rott .Eds., Use of Algae for Monitoring Rivers II. *Institut fur Botanik*. Univ. Innsbruck: 29-43.

Lim, D. S. S., Douglas, M. S. V., Smol, J. P., 2001. Diatoms and their relationship to environmental variables from lakes and ponds on Bathurst Island, Nunavut, Canadian High Arctic. *Hydrobiologia*. 450, 215-230.

Lobo A, Carla Giselda Heinrich, Marilia Schuch, Carlos Eduardo Wetzel, and Luc Ector 2004. Diatoms as bioindicators in Rivers.

Lowe, R. L., Laliberte, G. D., 1996. Benthic streamalgae: Distribution and structure. In Hauer, F. R., Lamberti, G. A. (Eds), *Stream Ecology*. AcademicPress, USA, 269-293.

Lowe, R. L., Pan, Y., 1996. Benthic algal communities as biological monitors. In *Algal ecology of freshwater benthic ecosystem*, Aquatic Ecology Series, Stevenson, R.J., Bothwell, M.L., Lowe, R.L., (Eds.) Academic Press, Boston pp, 705-739.

Mann, D. G. and S. J. M. Droop (1996). "Biodiversity, biogeography and conservation of diatoms." *Hydrobiologia* 336: 19-32.

Martin-Jézéquel, V., Hildebrand, M., & Brzezinski, M. A., 2000. Silicon metabolism in diatoms : implications for growth. *Journal of Phycology*, 36. 821–840.

Masseret, E., Amblard, C., Bourdier, G., 1998. Changes in the structure and metabolic activities of periphytic communities in a stream receiving treated sewage from a waste stabilizationpond. *Wat. Res.* 32, 2299-2314.

Mc Cormick P.V & Cairns JR J., 1994. Algae as indicators of environmental change. *J. Appl. Phycol.* 6: 509-526.

Mc Cormick, P.V., Louie, D., Cairns, J. J., 1994. Longitudinal effects of herbivory on lotic periphyton assemblages. *Fresh w. Biol.* 31, 1365-2427.

Mc Farland, B. H., Hill, B. H., Willingham, W. T., 1997. Abnormal *Fragilaria spp.*

*Bacillariophyceae* in streams impacted by mine drainage. *J. Fresh w. Ecol.* 12, 141-149.

Medley, C. N., Clements, W. H., 1998. Responses of diatom communities to heavy metals in streams: The influence of longitudinal variation. *Ecol. Appl.* 8, 631-644.

Morin, S., Vivas-Nogues, M., Duong, T. T., Boudou, A., Coste, M., Delmas, F., 2006. Dynamics of benthic diatom colonization in a cadmium/zinc-polluted river (Riou-Mort, France). *Arch. Hydrobiol.* (in press).

Norton, T. A., M. Melkonian, et al. (1996). "Algal biodiversity." *Phycologia* 35: 353-365.

Pascale Naim, 2010, Les diatomées, bio-indicatrices de la qualité des cours d'eau. Utilisation des diatomées pour évaluer la qualité d'un cours d'eau p1.

Patil, J. S., Anil, A. C., 2005. Biofilm diatom community structure: influence of temporal and substratum variability. *Biofouling.* 21, 189-206.

Patrick R., 1977. Ecology of fresh water diatoms & diatom communities. In *The Biology of Diatoms*, ed. D. Werner, Botanical Monographs, and Oxford: Blackwell, pp. 284–332.

Paulsson, M., Nystrom, B., Blanck, H., 2000. Long-term toxicity of zinc to bacteria and algae in periphyton communities from the river Go'ta A8 lv, based on a microcosm study. *Aquat. Toxicol.* 47, 243-257.

Peterson, C. G., Stevenson, R. J., 1989. Substratum condition and diatom colonization in difference current regimes. *J. Phycol.* 25, 790-793.

Pielou, E. C. (1966). The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13, 131-144.

Potapova, M., Charles, A. D. F., 2003. Distribution of benthic diatoms in U.S rivers to conductivity and ionic composition. *Fresh w. Biol.* 48, 1311-1328.

Potapova M., Charles F. D., 2005. Choice of substrate in algae-based water-quality assessment. *J. N. Am. Benthol. Soc.* 24, 415-427.

Poulin, M. and D. M. Williams (1998). "Conservation of diatom biodiversity: A perspective. 15th Int. Diatom Symp. Perth, Austr. (Abstract)." *Nature* 363: 234-240.

Prygiel J., 2000 Guide méthodologique pour la mise en œuvre de l'Indice Biologique Diatomées NF T 90-354. *Agences de l'Eau-Cemagref*, France, 134 p.

Prygiel J., Leveque L, Iserentant R., 1996. Un nouvel indice diatomique pratique pour l'évaluation de la qualité des eaux en réseau de surveillance. *Revue des Sciences de l'Eau*, 1 : 97-113. France

Prygiel, J., Coste M., Bukowska J., 1999. Review of the major diatom-based techniques for the quality assessment of rivers – State of the art in Europe, [In:] Prygiel J., Whitton B.A., Bukowska J. .red., Use of algae for monitoring rivers III, Agence de l'Eau Artois- Picardie, France. pp. 224-238.

Ragueneau O., Schultes S., Bidle K. D., Claquin P., & Moriceau B., 2006. Si & C interactions in the world ocean: Importance of ecological processes & implications for the role of diatoms in the biological pump. *Global Biogeochemical Cycles*, 20.4., 1–15.

Ramade F., 1984 – *Eléments d'écologie. Ecologie fondamentale*. Ed. Mc Graw-Hill. Paris, 397p.

Renberg I., & Hellberg T., 1982. The pH history of lakes in southwestern Sweden, as calculated from the subfossil diatom flora of the sediments. *Ambio*, 11: 30-33.

Rimet F., 2012. *Diatoms: an ecoregional indicator of nutrient, organic matter and micropollutants pollution*. Thesis, University of Grenoble, INRA-Thonon France, 2003 pp.

Rosemond, A. D., 1993. Interactions among irradiance, nutrients, and herbivores constrain a stream algal community. *Oecologia*. 94, 585-594.

Rott, E. 1991. Methodological aspects and perspectives in the use of periphyton for monitoring and protecting rivers. - In: Whitton, B.A., Rott, E. et Friedrich, G. (eds.), *Use of algae for monitoring rivers*. Institut für Botanik, Universität Innsbruck., 9-16.

Rott E., Hofmann G., Pall K., Pfister P. & Pipp E., 1997. Indikations listen für Aufwuchsalgen in Österreichischen Fließgewässern. Teil 1: Saprobielle Indikation Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft, Wien, 73 pp.

Rott, E., Duthie, H. C., Pipp, E., 1998. Monitoring organic pollution and eutrophication in the Grand River, Ontario, by means of diatoms. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55, 1443-1453.

Rott, E., Duthie, H. C., Pipp, E., 1998. Monitoring organic pollution and eutrophication in the Grand River, Ontario, by means of diatoms. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55, 1443-1453.

Rott E., Pipp E., Pfister P., Van Dam H., Ortler K., Binder N. & Pall K., 1999. Indikations listen für Aufwuchsalgen in österreichischen Fließgewässern. Teil 2: Trophieindikation sowie geochemische Präferenzen, taxonomische und toxikologische Anmerkungen. Wasserwirtschaftskataster, Bundesministerium f. Land- u. Forstwirtschaft, Wien, 248 pp.

Round, F. E. (1990). *The Ecology of Algae*. Cambridge, Cambridge University Press.

Round, F.E., Crawford, R.M. and Mann, D.G. (1990) *The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera*. Cambridge University Press, Cambridge, 747 pp.

Ruggiu, D., A. Luglié, et al. (1998). "Paleoecological evidence for diatom response to metal pollution in Lake Orta (N. Italy)." *J. Paleolimnol.* **20**: 333-345.

Rumeau A. and Coste M. 1988 *Initiation à la systématique des diatomées d'eau douce*. Pour l'utilisation pratique d'un indice diatomique générique. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* 309, 1-69.

Sabater, S., 2000. Diatom communities as indicators of environmental stress in the Guadiamar River, S-W Spain, following a major mine tailing spill. *J. Appl. Phycol.* 12, 113-124.

Schaumburg J., Schranz C., Hofmann G., Stelzer D., Schneider S. & Schmedtje U., 2004. Macrophytes & phytobenthos as indicator of ecological status in German lakes - a contribution to the implementation of the Water Framework Directive. *Limnologica*, 34,4: 302–314.

Sekar, R., Nair, K. V. K., Rao, V. N. R., Venugopalan, V. P., 2002. Nutrient dynamics and successional changes in a lentic fresh water biofilm. *Fresh w. Biol.* 47, 1893-1907.

Shannon C.E. & Weaver W., 1949. The mathematical theory of communication. University of Illinois. Urbana, Chicago, London. pp. 3–24.

Simpson, E.H. (1949) Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688.

Sládeček V., 1986. Diatoms as indicators of organic pollution. *Act. Hydrochim. Hydrobiol.* 14, 555-566.

Soininen, J., 2004. Benthic diatom community structure in boreal stream distribution patterns along environmental and spatial gradients. PhD Thesis, University of Helsinki, Finland, 46pp.

Soininen J., & Könönen K., 2004. Comparative study of monitoring South-Finnish rivers & streams using benthic macroinvertebrate & benthic Diatom communities structure. *Aquatic Ecology*, 38: 63-75.

Soldo, D., Behra, R., 2000. Long-term effects of copper on the structure of freshwater periphyton communities and their tolerance to copper, zinc, nickel and silver. *Aquat. Toxicol.* 47, 181-189.

Steinberg C, Schiefele S. 1988. Biological Indication of Trophy and Pollution of Running Waters. *Zeitschrift Fur Wasser Und Abwasser Forschung-Journal for Water and Wastewater Research* 21: 227-234.

Steinman, A. D., 1996. Effects of grazers on fresh water benthic algae. In *Algal ecology of fresh water benthic ecosystem*, Aquatic Ecology Series, Stevenson, R.J., Bothwell, M.L., Lowe, R.L., (Eds.) Academic Press, Boston, 341-366.

Stevenson J. R., 1983. Effects of current & conditions simulating autogenically changing microhabitats on benthic diatom immigration. *Ecology* 64, 1514-1524.

Stevenson, R. J., 1984. Epilithic and epipellic diatoms in the Sandusky River, with emphasis on species diversity and water pollution. *Hydrobiologia.* 114, 161-175.

Stevenson R. J., 1996. The stimulation & drag of current. In *Algal ecology of fresh water benthic ecosystem*, Aquatic Ecology Series, Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. Eds. Academic Press, Boston, 321-340.

Stevenson J. R., Peterson, C.G., 1989. Variation in benthic diatom. *Bacillariophyceae*. immigration with habitat characteristics & cell morphology. *J. Phycol.* 25, 120-129.

Stevenson, R. J., C. G. Peterson, (1991). "Density-dependent growth, ecological strategies, and effects of nutrients and shading on benthic diatom succession in streams." *J. Phycol.* 27: 5969.

Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. 1996. Algal Ecology Fresh water Benthic Ecosystems. Stevenson, R. J., Bothwell, M. L., Lowe, R. L. (Eds): Academic Press New York, 750 pp.

Stevenson, R. J., Pan, Y. P., 1999. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms. In: Stoermer, E. F., Smol, J. P. (Eds) The diatoms: Applications for the environmental and Earth Sciences. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1-40.

Tison J., Park Y. S., Coste M., Wasson J. G., Ector L., Rim & F., Delmas F., 2005. Typology of diatom communities & the influence of hydro-ecoregions: a study on the French hydrosystems scale. *Wat. Res.* 39, 3177-3188.

Treguer P., Nelson D.M., Van Bennekom A.J., De Master D.J., Leynaert A., Queguiner, B., 1995. The silica balance in the world ocean: a reestimate. *Science* 268, 375-379.

Treguer P. & Pondaven P., 2000. Global change: Silica control of carbon dioxide. *Nature* 406.694, 358-359.

Tuji, A., 2000. Observation of developmental processes in loose attached diatom (Bacillariophyceae) communities. *Phycol. Res.* 48, 75-84.

Van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J., 1994. A coded checklist & ecological indicator values of fresh water diatoms from Netherlands. *Neth J AquatEcol* 28: 117- 22 133.

Van de Grinten, E., 2004. Dynamic species interactions in phototrophic biofilms. PhD thesis, University of Amsterdam, 152 pp.

Van den Hoek, C., Mann, D. G., Jahn, H. M., 1995. Algae-an introduction to phycology: Cambridge University Press pp, 623 pp.

Vinebrooke, R. D., Graham, M. D., 1997. Periphyton assemblages as indicators of recovery in acidified Canadian Shield lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54, 1557-1568.

Watanabe, T., Asai, K., Houki, A., 1986. Numerical estimation to organic pollution of flowing water by using epilithic Diatom assemblage. Diatom assemblage Index (DAIpo). *Sci. Total Environ.* 55, 209-218.

Werner, D. E. (1977). "The Biology of Diatoms. Botanical Monographs. Vol. 13. Univ. of California Press. 498 pp."

Wetzel R. G. & Likens G. E., 2000. Limnological analysis. 3rd édition. Springer-Verlag Inc. New York, 429 p.

Whitton B. A., Rott E., 1996. Use of Algae for monitoring rivers II. Institut für Botanik, Univ. Innsbruck, Austria, 196 pp.

Winter, J. G., Duthie, H. C., 2000. Stream biomonitoring at an agricultural test site using benthicalgae. *Can. J. Bot.* 78, 1319-1325.