



Etude spatio-temporelle de la dynamique des cyanobactéries dans la retenue de Bort Les Orgues







Auteurs

Enora Briand, SCE

Catherine Quiblier, MNHN

Jean-François Humbert, INRA

Remerciements

Les auteurs remercient les personnes suivantes pour leur contribution à cette étude et à l'élaboration de ce document :

Frédéric Moinot (responsable de l'antenne Haute Dordogne), Viviane Battu (animatrice du contrat de rivière Haute Dordogne) et Nathalie Bardin (chargée de mission qualité des eaux d'EPIDOR) pour la mise en place et le suivi de cette étude.

Bruno Delpeyrat (technicien EPIDOR), Thomas Monestier et Nicolas Parmentier (stagiaires EPIDOR) pour les campagnes de prélèvement.

Aurélie Ledreux (doctorante MNHN) pour les analyses de saxitoxines.

Le laboratoire de chimie de l'INRA de Thonon Les Bains pour les analyses physicochimiques.

Avec le partenariat financier de :

L'Agence de l'Eau Adour Garonne

La SAUR

EDF







Résumé

La retenue de Bort Les Orgues fait partie des nombreux plans d'eau, situés sur le bassin versant de la Dordogne, qui abritent régulièrement des efflorescences à cyanobactéries, perturbant les activités hydroélectriques et touristiques du plan d'eau. Afin de mieux comprendre la dynamique spatio-temporelle des proliférations, d'identifier les facteurs environnementaux favorables à leur mise en place et d'établir une stratégie de suivi à plus long terme adaptée au site, une étude de la communauté phytoplanctonique a été réalisée en plusieurs points d'échantillonnage dans cette retenue, pendant deux ans (de juin à octobre 2006 et 2007). La première année, aucune efflorescence à cyanobactérie n'a été observée. L'effet d'une vidange partielle, l'hiver précédent la campagne, est suspecté. Cependant, sur les deux années, un gradient décroissant d'eutrophisation entre l'amont et l'aval a été mis en évidence. En 2007, trois espèces phytoplanctoniques contribuaient principalement à la biomasse chlorophylienne totale. Il s'agissait d'une diatomée, Fragilaria crotonensis et de deux cyanobactéries potentiellement toxiques: Aphanizomenon flos-aquae et Anabaena flos-aquae. Le développement des cyanobactéries a été observé à partir de fin juillet 2007, Anabaena flos-aquae se distribuant plutôt à l'aval de la retenue et Aphanizomenon flosaquae plutôt en amont. L'utilisation d'une sonde fluorescente immergeable a permis de mettre en évidence l'influence de la stratification thermique sur la distribution spatiale (horizontale et verticale) des trois espèces phytoplanctoniques dominantes, en liaison avec leurs stratégies de développement. D'autre part, nous avons pu montrer que les vents du nord-est ont un impact important sur la structuration spatio-temporelle des biomasses phytoplanctoniques. Enfin, grâce aux connaissances acquises au cours de ces deux années, il est désormais possible de proposer des stratégies d'échantillonnages adaptées aux suivis et à l'évaluation des risques liés aux proliférations des cyanobactéries sur la retenue de Bort Les Orgues en réponse aux attentes des gestionnaires et utilisateurs du plan d'eau.

Liste des figures

Figure 1: Mesures de la température de l'eau (°C) aux 6 stations et aux différentes dates de
prélèvement en 2006
Figure 2: Mesures de la transparence (cm) aux 6 stations et aux différentes dates de
prélèvement en 2006
Figure 3 : Mesures des concentrations en oxygène dissous (mg L ⁻¹) aux 6 stations et aux
différentes dates de prélèvement en 2006
Figure 4: Mesures de pH aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en
2006
Figure 5 : Mesures de la conductivité (μS cm ⁻¹) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2006
Figure 6 : Mesures de la température de l'eau (°C) aux 6 stations et aux différentes dates
de prélèvement en 200744
Figure 7: Mesures de la transparence (cm) aux 6 stations et aux différentes dates de
prélèvement en 2007
Figure 8 : Mesures des concentrations en oxygène dissous (mg L ⁻¹) aux 6 stations et aux
différentes dates de prélèvement en 2007
Figure 9: Mesures de pH aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en
200745
Figure 10 : Mesures de la conductivité (µS cm ⁻¹) aux 6 stations et aux différentes dates de
prélèvement en 2007
Figure 11: Transect amont (point 1)/ aval (point 6) des concentrations en chlorophylle a
total et des biomasses des trois espèces phytoplanctoniques dominantes (eq. µg Chla L ⁻¹)
au 23/07/0750
Figure 12: Histogrammes empilés des biomasses (eq. µg Chla L ⁻¹) des trois espèces
phytoplanctoniques dominantes aux points 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D), 5 (E) et 6 (F) pendant
les campagnes de prélèvements de l'année 2007
Figure 13 : Profils verticaux de température (points noirs) et des biomasses des différents

grands groupes phytoplanctoniques (eq. µg Chla L ⁻¹): algues vertes (points verts clairs),
cyanobactéries (points bleus), diatomées (points rouges) et chlorophylle a totale (points
verts foncés) aux points 1 (A, B et C) et 6 (D, E et F) les 23 juillet, 7 août et 18
septembre53
Figure 14 : Analyse en composantes principales réalisée sur les estimations des différentes
variables environnementales et biologiques obtenues sur les 79 échantillons prélevés entre
juin et octobre 200755
Figure 15 : Multidimensional Scaling sur les données de biomasses (eq. µg Chla L ⁻¹) des
trois espèces phytoplanctoniques dominantes pour chaque campagne de prélèvement de
1'année 200757
Figure 16: Evolution des variables météorologiques: températures maximales et
minimales de l'air (°C), précipitations (mm), à la station Saint-Sulpice (amont de la
retenue) du 15 juin au 2 octobre 2007
Figure 17 : Evolutions des débits en amont (à Argentat), de la hauteur d'eau de la retenue
et de la pluviométrie à Brive64
Figure 18 : Courbe de croissance de cyanobactéries et niveaux de détection en fonction de
l'expérience de l'observateur67
Figure 19 : Schéma décisionnel pour l'évaluation des risques associés aux cyanobactéries
et à leurs toxines

Liste des tableaux

Tableau 1 : Flux de nitrate et de phosphore total des principaux affluents du bassin versan
de la retenue de Bort Les Orgues en 1996-97, 2004, 2005 et 2006
Tableau 2: Conditions de prélèvement lors des différentes campagnes réalisées sur la
retenue de Bort Les Orgues en 2006
Tableau 3: Concentrations en azote total (mg N L-1) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 200639
Tableau 4 : Concentrations en phosphore total (mg P L ⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 200639
Tableau 5: Concentrations en ammonium (mg N L ⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 200640
Tableau 6 : Concentrations en nitrate (mg N L ⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant
la période d'étude en 200640
Tableau 7: Concentrations en phosphate (mg P L-1) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 2006
Tableau 8 : Concentrations en chlorophylle a (μg Chla L ⁻¹) aux 6 stations
d'échantillonnage pendant la période d'étude en 200641
Tableau 9 : Conditions de prélèvement lors des différentes campagnes réalisées sur la
retenue de Bort Les Orgues en 2007
Tableau 10 : Concentrations en azote total (mg N L ⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 200746
Tableau 11 : Concentrations en phosphore total (mg P L ⁻¹) aux 6 stations
d'échantillonnage pendant la période d'étude en 200747
Tableau 12 : Concentrations en ammonium (mg N L ⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 200747
Tableau 13 : Concentrations en nitrate (mg N L ⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 2007
Tableau 14 : Concentrations en phosphate (mg P L ⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage
pendant la période d'étude en 2007
pendunt in periode a code on 2007

Tableau	15 :	Concentrations	s en	chlorophylle	e a	(µg	Chla	L^{-1}) aux	6	stati	ions
d'échantil	lonna	ge pendant la pe	ériode	d'étude en 20	007							49
Tableau	16:	Récapitulatif	des	échantillons	anal	ysés	pour	la	quantif	ïcati	on	des
microcystines (eq. µg MC-LR L ⁻¹), des saxitoxines et/ou la détection de l'anatoxine-a59												

Liste des cartes

Carte 1 : Découpage administratif de la Haute Dordogne. Bassins versants de la Dordogne
et de la Rhue20
Carte 2 : Répartition des résultats des analyses cyanobactéries des plans d'eau relevés par
les DDASS du bassin de la Dordogne en 2004 et 200524
Carte 3: Localisation des plans d'eau disposant d'un captage destiné à l'alimentation en
eau potable25
Carte 4 : Localisation des points de prélèvements sur la retenue de Bort Les Orgues29

Liste des abréviations

(FD)AAPPMA: (Fédération Départementale des) Associations Agrées pour la Pêche et la

Protection des Milieux Aquatiques

ACP: Analyse en Composantes Principales

ANR: Agence Nationale de la Recherche

Chla : Chlorophylle *a*

CLHP-SM: Chromatographie Liquide Haute Performance – Spectrométrie de Masse

CLHP-UV: Chromatographie Liquide Haute Performance – Ultra Violet

CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France

DCE: Directive Cadre sur l'Eau

DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt

DDASS: Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales

DGS: Direction Générale de la Santé

DIREN : Direction Régionale de l'Environnement

DRASS: Direction Régionale des Affaires Sanitaires et Sociales

EDF: Electricité De France

ELISA: Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay

EPIDOR : Etablissement Public Interdépartemental du basin de la DORdogne

GPS: Global Positioning System

INRA: Institut National de Recherche Agronomique

LDQ: Limite De Quantification

MC-LR: Microcystine – LR

MDS: MultiDimensional Scaling analysis

MISE: Mission Inter Service de l'Eau

MNHN: Muséum National d'Histoire Naturelle

Neuro-2a: Neuroblastome-2a

OECD: Organization for Economic Cooperation and Development

PP2a: Protéine Phosphatase 2a

PRECODD: Programme de Recherche sur les Ecotechnologies et le Développement

Durable

SAU: Surface Agricole Utile

SEQ Eau : Système d'Evaluation de la Qualité de l'Eau

<u>Départements</u>:

19: Corrèze

24 : Dordogne

46: Lot

63 : Puy de Dôme

Sommaire

	E SPATIO-TEMPORELLE DE LA DYNAMIQUE DES CYANOBACTERI LA RETENUE DE BORT LES ORGUES	
I. Coi	ntexte général de l'étude	14
II. P	Problématique et objectifs de l'étude	15
III. P	résentation de la retenue et de son bassin versant	17
III.1.	Caractéristiques générales de la retenue	
III.2.	Caractéristiques générales du bassin versant	
A.	Localisation et description générale	
B.	Population et urbanisation	
C.	Relief	18
D.	Géologie et pédologie	19
E.	Climat	19
F.	Hydrographie	
G.	Hydrologie	
Н.	Occupation du sol	
I.	Activités humaines	
III.3.	Etat des lieux de la problématique cyanobactérie sur le bassin versant de la Dordogne	
Α.	Plans d'eau à usage baignade	
В.	Plans d'eau destinés à l'alimentation en eau potable	
III.4.	Etat trophique de la retenue de Bort Les Orgues	26
IV. E	Etude de la retenue de Bort les Orgues	28
IV.1.	Méthodologie	
A.	Mise en place de la stratégie d'échantillonnage – Points échantillonnés	
В.	Variables étudiées	
1		
2		
3	Etude de la toxicite potentielle	32
4	Présence d'anatoxine-a	33
C.	Analyses statistiques	34
1) Analyse en composantes principales	34
2	,	
IV.2.	1	
A.	Année 2006	
1) Caractéristiques physico-chimiques de la retenue	
2		
3		
В.	Année 2007	
1	, <u> </u>	
2		
3	·	
4		
5		
IV.3.	Conclusions - Perspectives	
A.	Organisation du suivi d'un plan d'eau présentant un risque à cyanobacteries et paramètres p	
	sidération	65
1		<u> </u>
	patiale	
2 3		
3	j venie prediable a une eventuelle efflorescelle	0 /

VI	Δn	nevec	87
V.	Réf	érences bibliographiques	78
	3)	Suivi des concentrtaions en éléments nutritifs	/ /
	2)	Suivi expérimental et prospectif de la prolifération des cyanobactéries	
	1)	Suivi classique et ciblé de la prolifération des cyanobactéries	
	B.	Proposition de suivi sur la retenue de Bort Les Orgues	
	6)	Paramètres physico-chimiques	73
	5)	Détection des cyanotoxines	
	4)	Estimation de la biomasse phytoplanctonique présente	68

ETUDE SPATIO-TEMPORELLE DE LA DYNAMIQUE DES CYANOBACTERIES DANS LA RETENUE DE BORT LES ORGUES

ETUDE SPATIO-TEMPORELLE DE LA DYNAMIQUE DES CYANOBACTERIES DANS LA RETENUE DE BORT LES ORGUES

I. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

Les lacs et étangs constituent sur le bassin versant de la Dordogne, un patrimoine historique, biologique et paysager important. Cependant, au cours de ces dernières années, de nombreux plans d'eau ont été sujets à des développements massifs de cyanobactéries. Ces cyanobactéries sont des microorganismes photosynthétiques capables de proliférer dans les lacs et rivières quand les conditions environnementales sont favorables à leur croissance. Ces proliférations (aussi appelées blooms ou efflorescences) qui traduisent une dégradation de la qualité de l'eau, conduisent à des perturbations du fonctionnement des écosystèmes aquatiques (perturbation de l'oxygénation du milieu, diminution de la biodiversité). Par ailleurs, les genres les plus souvent impliqués dans ces phénomènes sont susceptibles de produire des toxines dangereuses pour la santé humaine et animale. En 2004, un bilan réalisé sur la région Limousin a montré que sur 91 baignades, presque ¼ ont été fermées pour cause de proliférations de cyanobactéries. De plus, dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), les cyanobactéries constituent un enjeu important pour atteindre les objectifs fixés pour 2015 par la DCE concernant le bon état écologique des masses d'eau continentales. Une forte mobilisation de la part des acteurs locaux de gestion et des services de l'Etat a permis une réelle prise en compte de cette problématique et des moyens humains et financiers ont été investis en de nombreux endroits en France au cours de ces dernières années.

Conscient de ce problème, l'établissement EPIDOR a souhaité effectuer un état des lieux précis des problèmes liés aux proliférations de cyanobactéries sur son territoire dans le but d'estimer, entre autres choses, les conséquences de ces phénomènes sur les différents usages de l'eau. Cet état des lieux s'est traduit par la réalisation d'une enquête auprès des acteurs du bassin : DDASS, DIREN, MISE, fédérations de pêche, AAPPMA. L'objectif était, d'évaluer la répartition et l'évolution spatiale et temporelle des développements cyanobactériens, mais aussi d'informer et de sensibiliser l'ensemble des acteurs de la gestion de l'eau sur le sujet. Cette partie a fait l'objet d'un stage de Master 2 en 2006 (Monestier, 2006).

Soucieux de faire bénéficier le bassin versant de la Dordogne de programmes de recherches qui le concerne directement, EPIDOR a proposé que la retenue de Bort Les Orgues soit intégrée à la thèse réalisée par E. Briand dans le cadre d'un partenariat (convention CIFRE) entre SCE (bureau d'études), l'INRA de Thonon et le MNHN de Paris. En effet, cette retenue est la 3ème en France par sa taille, et elle a été classée en zone sensible d'après le décret du 24 novembre 1994, ce qui a d'ailleurs justifié la création du Contrat de Rivière Haute Dordogne en 2003. Outre son rôle de réservoir hydroélectrique, ce plan d'eau constitue un enjeu touristique très fort pour le territoire (baignade, activités nautiques, pêche...). Malheureusement, cette retenue a abrité à plusieurs reprises, des proliférations importantes de cyanobactéries (*Microcystis aeruginosa*, espèce potentiellement toxique susceptible de produire des toxines de type microcystines) qui ont provoqué une interdiction de baignade sur la plage corrézienne des Aubazine Hautes en août 2004 et 2005. Ainsi, ces efflorescences font de cette retenue, un site d'étude très intéressant, ce qui a motivé l'intégration de son suivi durant les années 2006 et 2007 au travail de thèse indiqué ci-dessus. Le présent rapport restitue les résultats de ce suivi.

II. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Lors de la mise en place du suivi d'un plan d'eau régulièrement concerné par des proliférations à cyanobactéries, les gestionnaires et utilisateurs des plans d'eau sont confrontés à différents problèmes :

- Le premier de ces problèmes est lié aux difficultés dues au fait qu'il est difficile de prédire l'apparition d'une prolifération de cyanobactéries de même que son évolution temporelle. En effet, ces proliférations peuvent apparaître et disparaître sur une très courte échelle de temps (quelques jours) et une forte variabilité interannuelle peut également être observée.
- Le second problème est lié aux différences qui existent entre espèces dans leurs stratégies de développement, dont l'une des conséquences est de rendre leur distribution spatiale plus ou moins agrégée. Ainsi, certaines espèces, comme *Planktothrix agardhii*, peuvent avoir un développement dispersé, une répartition homogène dans la partie superficielle de la colonne d'eau pour les lacs profonds ou

dans toute la colonne d'eau pour les lacs peu profonds. Le genre *Microcystis* se développe quant à lui, plutôt en surface (on parle alors de « fleur d'eau »), grâce aux vésicules à gaz présentes dans les cellules. D'autres espèces, comme *Planktothrix rubescens* trouveront les conditions favorables à leur développement dans le métalimnion (zone intermédiaire de la colonne d'eau où les températures chutent brutalement). Ces différences dans l'occupation de la colonne d'eau ont des conséquences sur les stratégies d'échantillonnage à mettre en œuvre pour surveiller ces espèces.

- Outre des différences dans la répartition verticale des espèces, il existe aussi des disparités de répartition dans la dimension horizontale des plans d'eau qui peuvent également être observées entre les espèces dans le cas de proliférations plurispécifiques ou pour une même espèce en fonction du temps et des caractéristiques environnementales. Ainsi, l'existence de zones privilégiées pour le déclenchement des proliférations est par exemple suspectée. L'évolution temporelle de l'intensité de la prolifération et de sa distribution spatiale pourrait aussi dépendre des caractéristiques de l'espèce qui prolifère, de la typologie des plans d'eau (morphologie, hydrodynamisme...) et des contraintes environnementales qui s'exercent sur eux (phénomènes climatiques, affluents...).

Compte tenu du contexte général de l'étude, de la demande des acteurs locaux en charge de la gestion et de l'utilisation de cette retenue et de la problématique associée à la mise en place des proliférations à cyanobactéries, des questions scientifiques d'intérêt ont été identifiées par les équipes de recherche et les objectifs suivants ont été définis pour cette étude :

- Etudier la dynamique spatiale et temporelle des proliférations à cyanobactéries et les conséquences de cette dynamique sur les protocoles d'échantillonnages à utiliser pour évaluer au mieux la distribution et l'abondance de ces microorganismes dans un plan d'eau de grande taille.
- Evaluer les concentrations en microcystines et leur évolution temporelle.
- Identifier les facteurs environnementaux favorisant le développement des proliférations de cyanobactéries. Même si l'on sait que les apports excessifs en

nutriments et notamment en phosphore sont déterminants dans l'apparition des proliférations de cyanobactéries, d'autres facteurs et processus interviennent aussi dans ce phénomène et leur importance relative reste à déterminer.

III. PRESENTATION DE LA RETENUE ET DE SON BASSIN VERSANT

III.1. CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA RETENUE

Le barrage hydroélectrique de Bort les Orgues situé dans la partie supérieure du cours de la Dordogne, est le plus important du Massif Central. Cette retenue de 21 km de long, sous concession EDF, a été mise en service en 1952. Les principales autres caractéristiques de ce plan d'eau sont :

- superficie de 1073 ha
- volume de 477 millions de m³ (3^{ème} retenue de France)
- profondeur maximale de 95 m pour une profondeur moyenne de 33 m
- altitude de 540 m
- hauteur de la digue de 120 m

Ce plan d'eau artificiel représente un haut lieu touristique pour la région, avec de nombreuses plages, des campings et des gîtes. Il génère donc une activité économique essentielle pour les communes limitrophes. Par conséquent, il constitue un enjeu important sur le territoire de la Haute Dordogne de par les multiples intérêts et usages qu'il permet. La préservation de sa qualité se doit ainsi d'être une démarche active et concertée entre les différents acteurs contribuant à la bonne santé de ce plan d'eau.

III.2. CARACTERISTIQUES GENERALES DU BASSIN VERSANT

A. LOCALISATION ET DESCRIPTION GENERALE

Le bassin versant de la retenue de Bort les Orgues comprend le bassin versant amont de la Dordogne ainsi qu'une partie du bassin versant de la Rhue (jusqu'au barrage de Vaussaire). Administrativement, il s'étend sur 1740 km², sur 2 régions (Auvergne et Limousin) et 4 départements (Corrèze, Creuse, Cantal et Puy de Dôme). Il est délimité à l'est par les Monts-Dore, au sud par les Monts du Cantal, à l'ouest par le plateau des Millevaches et au nord par la région des Combrailles (Carte 1). Sur ce secteur, la Dordogne s'écoule sur 55 km de sa source au barrage de Bort les Orgues et elle conflue avec 6 cours d'eau principaux :

- en rive gauche : la Mortagne (17 km), la Burande (27 km), la Tialle (22 km) et la Rhue (par la conduite forcée)
- en rive droite : le Chavanon (28 km), le Dognon (26 km) et le Lys (17 km)

B. POPULATION ET URBANISATION

Au dernier recensement, la population sur le bassin versant de la retenue de Bort les Orgues était de 51514 habitants permanents. Les communes sont rurales avec une densité moyenne de la population inférieure à 20 habitants par km², variant de 1,7 hab/km² sur la commune de La Godivelle (63) à 238 hab/km² sur celle de Bort les Orgues (19). La population se concentre sur les communes de Bort les Orgues, Riom ès Montagne, la Bourboule, le Mont Dore et Messeix. Cette population augmente considérablement lors des périodes touristiques (hiver et été) avec d'importantes capacités d'accueil dans la région.

C. Relief

Le bassin versant de la retenue de Bort les Orgues se situe au cœur du Massif Central, massif ancien rajeuni par l'activité volcanique de plusieurs grands ensembles, notamment les Monts-Dore et les Monts du Cantal situés en partie sur ce territoire. Ainsi, le bassin versant comprend des altitudes comprises entre 1885 m au Puy de Sancy et environ 540 m au niveau du barrage.

D. GEOLOGIE ET PEDOLOGIE

L'histoire géologique du haut bassin de la Dordogne est celle d'un socle primaire rajeuni par le volcanisme et isolé par les glaciers quaternaires. La nature des roches est essentiellement métamorphique et volcanique ce qui implique des caractéristiques particulières des eaux de surface (pH plutôt acide et conductivité faible) et des eaux souterraines (présence d'eaux thermales et faibles aquifères). Quant à la nature des sols, on note une certaine homogénéité sur l'ensemble du bassin versant, avec, pour la plupart, des sols bruns et limoneux, sols peu perméables favorisant ainsi le ruissellement des eaux de surface et donc un transfert plus rapide des nutriments ou polluants vers le réseau hydrographique.

E. CLIMAT

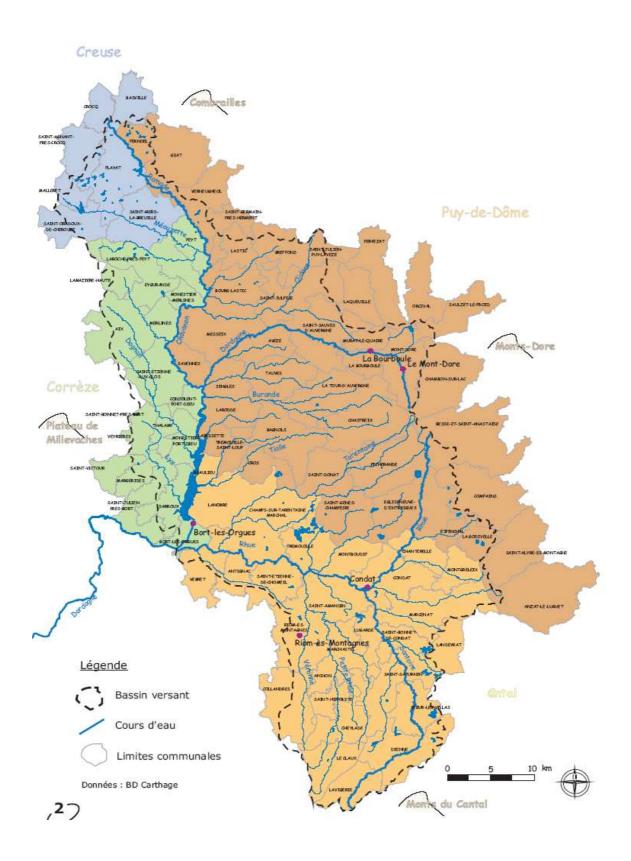
Le climat de Haute Dordogne est de type continental caractérisé par des hivers froids et secs et des étés tempérés. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1300 mm. L'enneigement des massifs, entre décembre et mars, constitue un stock d'eau important et la fonte nivale influence fortement les débits qui augmentent au printemps.

F. HYDROGRAPHIE

Le réseau hydrographique du bassin versant de la retenue de Bort les Orgues est très dense en raison de la faible perméabilité des sols. Le linéaire total des cours d'eau sur l'ensemble du bassin versant est de plus de 2000 km.

G. HYDROLOGIE

La Haute Dordogne possède plusieurs stations limnimétriques (suivies par la DIREN Auvergne et EDF) qui permettent de suivre le débit des cours d'eau. Les débits sont étroitement liés au climat, en raison du court temps de réponse des bassins sur roche imperméable et de la faiblesse des réseaux souterrains. En période pluvieuse (automne) ou de fonte nivale (printemps), les cours d'eau atteignent rapidement leur débit de crue. Celui-ci peut varier du simple au triple entre l'été et le printemps.



Carte 1 : Découpage administratif de la Haute Dordogne. Bassins versants de la Dordogne et de la Rhue.

De plus, les débits sont influencés par la présence de nombreux étangs, notamment sur la partie nord-ouest du bassin versant, et par les retenues hydroélectriques qui engendrent des variations artificielles de débits en aval (éclusées). Ces éclusées provoquent des nuisances pour la vie piscicole, l'état des berges mais aussi des risques pour la sécurité des usagers.

H. OCCUPATION DU SOL

Le territoire de la Haute Dordogne est occupé à environ 45% par des zones de prairies et 45% par des zones boisées. Les 10% restants sont formés par des zones urbanisées et des zones de culture.

I. ACTIVITES HUMAINES

L'activité agricole sur ce territoire est essentiellement constituée par l'élevage bovin avec un double objectif de production de lait et de viande. La Surface Agricole Utile (SAU) est majoritairement affectée aux pâtures (96%), utilisées pour l'alimentation des animaux. Le fourrage et les légumes constituent une production minoritaire.

Les industries sont peu nombreuses et concernent principalement l'agro-alimentaire. Ainsi on recense 4 laiteries importantes sur le territoire du bassin versant de la retenue. Il existe également une usine d'embouteillage d'eau de source aux Monts-Dore. Enfin, les mines de charbon situées autour de Messeix dans le Puy de Dôme ont été exploitées jusqu'en 1989. L'arrêt de l'exploitation minière a nécessité la création de bassins de décantation près de la Dordogne et de la Clidane pour épurer les eaux chargées en fer et en manganèse issues des mines.

On trouve un grand nombre de barrages hydroélectriques sur le bassin versant de la retenue de Bort les Orgues. Celui de Bort est le plus important d'entre tous aussi bien par sa taille que par sa production d'électricité. Les barrages situés sur le bassin versant de la Rhue sont interconnectés entre eux par un réseau de conduites forcées qui détournent les eaux de plusieurs petits ruisseaux vers des retenues artificielles, de manière à offrir une meilleure production d'énergie. Au final, toutes ces conduites acheminent l'eau vers le barrage de Vaussaire qui lui-même renvoie ces eaux vers l'usine de la Rhue où elles sont turbinées

avant d'être rejetées dans la retenue de Bort Les Orgues. Par conséquent, la présence de cet important complexe de barrages permet une production d'énergie instantanée qui, avec d'autres usines de la chaîne Dordogne, contribue à la fourniture d'électricité de pointe en période de forte demande.

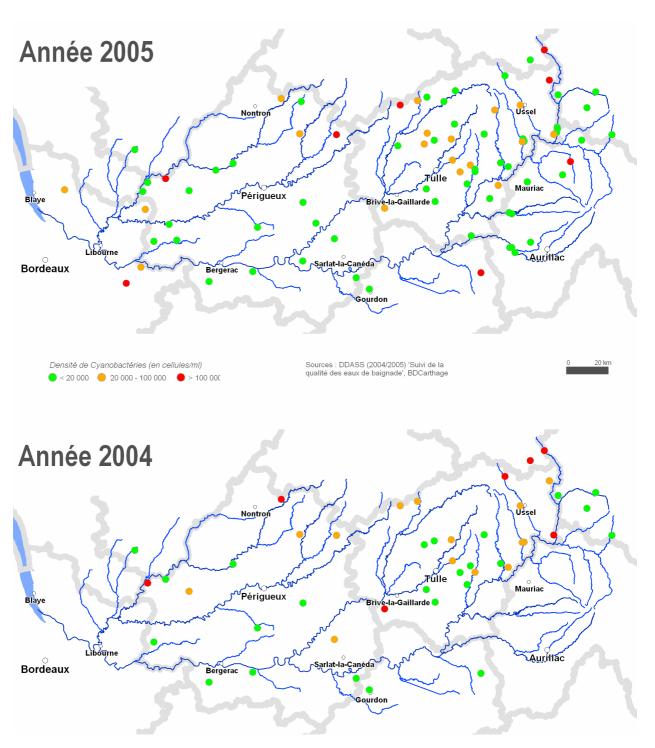
III.3. ETAT DES LIEUX DE LA PROBLEMATIQUE CYANOBACTERIE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA DORDOGNE

Ce diagnostic a fait l'objet d'un stage de Master 2 en 2006 (Monestier, 2006). Les enquêtes ont été menées auprès des acteurs de la gestion de l'eau et des services de l'état (DDASS, DDAF, DIREN, Fédération de pêche, AAPPMA) suivant les usages. En effet, depuis plusieurs années, il a été constaté sur le bassin versant de la Dordogne une dégradation régulière de la qualité de l'eau due au phénomène de développement de cyanobactéries, sur des plans d'eau présentant différents usages : baignade, loisirs nautiques, alimentation en eau potable, pêche, abreuvement du bétail. Le but de ce diagnostic était d'évaluer le degré d'affectation de ces différents usages sur le bassin de la Dordogne et la répartition temporelle et spatiale des proliférations de 2003 à 2005. A l'heure actuelle, seules les enquêtes menées auprès des DDASS concernant l'usage baignade et alimentation en eau potable sont exploitables. Aucun retour des enquêtes menées auprès des AAPPMA n'a été obtenu.

A. PLANS D'EAU A USAGE BAIGNADE

Les résultats de cette enquête montrent une implication de plus en plus importante de la part des DDASS en terme de surveillance des eaux de baignade suite aux premières recommandations de la DGS publiées en 2002 (Circulaire DGS/SD7A/2002-335 du 7 juin 2002). Depuis 2005, les 81 plans d'eau recensés sont suivis et les cyanobactéries y sont également recherchées. Au niveau de la répartition spatiale, un nombre important de plans d'eau abritant des efflorescences à cyanobactéries a été observé sur les parties nord Corrèze et sud-est Creuse (Carte 2). Cette région a subit au cours des dernières décennies la perte de nombreuses zones humides, par drainage des terres notamment. Or ces zones sont susceptibles de jouer un rôle tampon dans le transfert des nutriments. En parallèle, de

nombreux lacs et étangs ont vu le jour et se sont donc progressivement chargés en nutriments ce qui a conduit à leur eutrophisation. L'espèce de cyanobactérie qui se développe majoritairement est *Microcystis aeruginosa*. Cette espèce a été observée à un niveau seuil d'alerte 1 (20 000 cellules mL⁻¹) ou 2 (100 000 cellules mL⁻¹) dans 55% des plans d'eau suivis en 2004 et 38% en 2005. Il s'agit d'une espèce potentiellement toxique, susceptible de produire une hépatotoxine du nom de microcystine. On note également la présence des genres *Aphanotece*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon*, et *Woronichinia*.

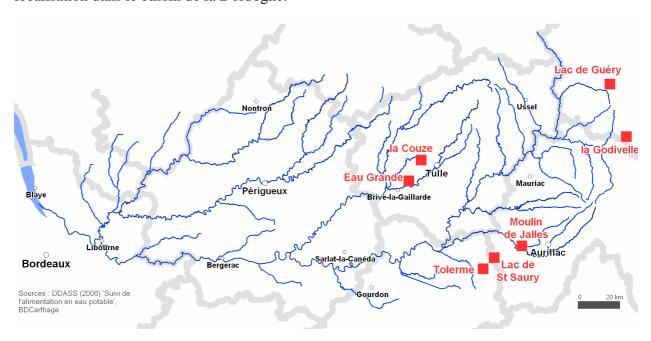


Carte 2: Répartition des résultats des analyses cyanobactéries des plans d'eau prélevés par les DDASS du bassin de la Dordogne en 2004 et 2005.

B. PLANS D'EAU DESTINES A L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Les plans d'eau destinés à l'alimentation en eau potable sont localisés sur la carte 3. Ainsi, il a été observé des développements de cyanobactéries en 2002 sur la retenue de la Couze (19) qui alimente environ la moitié de la ville de Brive et en 2005 et 2006 sur le plan d'eau du Tolerme (46) qui a nécessité un traitement supplémentaire au charbon actif. De plus, en août 2006, sur la commune de la Coquille (24), un captage en rivière a été touché par un développement de cyanobactéries (15 000 à 20 000 cellules mL⁻¹) provenant de nombreux étangs situés en amont. La collectivité ne disposant pas de traitement, il a été déconseillé de boire cette eau pendant deux semaines et des bouteilles d'eau ont été distribuées à la population.

En conclusion, il semble donc que les cyanobactéries soient présentes avec des abondances élevées dans un nombre important de plans d'eau, sans différenciation apparente en fonction de leur usage (activités récréatives ou production d'eau potable) ou de leur localisation dans le bassin de la Dordogne.



Carte 3 : Localisation des plans d'eau disposant d'un captage destiné à l'alimentation en eau potable.

III.4. ETAT TROPHIQUE DE LA RETENUE DE BORT LES ORGUES

L'eutrophisation d'un plan d'eau se produit suite à des apports nutritifs importants (azote et phosphore) dont la provenance peut avoir une origine double : endogène (par relargage à partir des sédiments), ou exogène de sources ponctuelles (effluents domestiques et industriels) ou diffuses (lessivage des terres agricoles et autres terrains).

La retenue de Bort Les Orgues présente une grande importance sur les plans économique et touristique. Ainsi, dans le cadre de la Directive Européenne sur les Eaux Résiduaires Urbaines de mai 1994 et de son décret d'application du 24 novembre 1994, le secteur de Bort Les Orgues a été classé en zone sensible, ce qui témoigne de la fragilité du plan d'eau. C'est pourquoi des études sur la qualité de la retenue ont été engagées depuis 1994 par le Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nantes en collaboration avec le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand. Les résultats des mesures réalisées sur les eaux du réservoir en 1993-1994, situaient déjà les eaux de la retenue de Bort Les Orgues dans la catégorie eutrophe (OECD, 1982).

Dans les sédiments, le stock de phosphore potentiellement relargable a été estimé à 330 tonnes (Brigault, 1998). Cependant, compte tenu de la topographie (pentes très raides dépourvues de sédiment), les conditions favorables au relargage ne se produisent pas sur l'ensemble de la retenue. De plus, en période d'oxygénation, les risques de relargage sont nuls. La retenue peut toutefois présenter une zone anoxique à certaines périodes et dans ces conditions les échanges de phosphore à l'interface eau-sédiment sont possibles.

L'analyse bibliographique des précédentes études sur l'eutrophisation de la retenue (Brigault, 1998; Ruban *et al.*, 1999) mise en relation avec le suivi qualité effectué sur le bassin versant de la retenue dans le cadre du Contrat de Rivière Haute Dordogne (EPIDOR, 2004; 2005; 2006) montre l'importance des transferts de nutriments (phosphore total et nitrate) vers les cours d'eau par ruissellement et par érosion des sols lors des épisodes de

crues (Tableau 1).

Flux de nitrate (T an ⁻¹)	96-97	2004	2005	2006
Dordogne	55,8 soit 6%	190,67 soit 13,5%	160,01 soit 11,6%	247 soit 5,7%
Chavanon	148.8 soit 16%	465,23 soit 33%	540,21 soit 39,1%	907 soit 21,1%
Tialle	83,7 soit 9%	35,32 soit 2,5%	15,63 soit 1,1%	55,2 soit 1,3%
Rhue	372 soit 40%	720,45 soit 51%	666,73 soit 48,2%	3070 soit 71,7%
Autres affluents : Mortagne, Burande, Lys et Dognon	269,7 soit 29%	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Flux total	930	1411,67	1382,57	4280

Flux de phosphore (T an ⁻¹)	96-97	2004	2005	2006
Dordogne	16,9 soit 14%	5,50 soit 19,9%	2,05 soit 9,6%	7,2 soit 38%
Chavanon	16,9 soit 14%	6,30 soit 22,8%	1,56 soit 7,3%	3,6 soit 19%
Tialle	10,9 soit 9%	0 soit 0%	0,04 soit 0,2%	0,8 soit 4,2%
Rhue	43,6 soit 36%	15,85 soit 57,3%	17,70 soit 82,9%	7,5 soit 39,3%
Autres affluents : Mortagne, Burande, Lys et Dognon	32,7 soit 27%	non mesuré	non mesuré	non mesuré
Flux total	121	27,66	21,35	19,1

Tableau 1: Flux de nitrate et de phosphore total des principaux affluents du bassin versant de la retenue de Bort Les Orgues en 1996-1997, 2004, 2005 et 2006.

Ces trois années mettent en évidence la prédominance de la Rhue, qui possède le sous bassin le plus important, dans les apports nutritifs en azote et en phosphore de la retenue de Bort les Orgues. Le Chavanon et la Dordogne contribuent également fortement alors que les apports de la Tialle sont négligeables. Cependant, il semble que l'axe Chavanon ait gagné en importance en terme d'apports, contrairement à l'axe Dordogne qui semble se maintenir et surtout à l'axe Tialle, qui parait aujourd'hui marginal. Sur l'axe Chavanon, on dénombre une importante chaîne d'étangs pour beaucoup eutrophisés (notamment les plans d'eau du bassin versant de la Ramade et de l'Abeille qui sont fermés régulièrement à la baignade). Des pollutions agricoles diffuses ont fortement contribué à la dégradation de la qualité des eaux du territoire. Ainsi il est établi que la grande majorité du phosphore provient de l'activité agricole sur le bassin versant (environ 90%), le reste étant du aux systèmes d'assainissement domestiques et industriels (Monestier, 2006). En effet, en 21

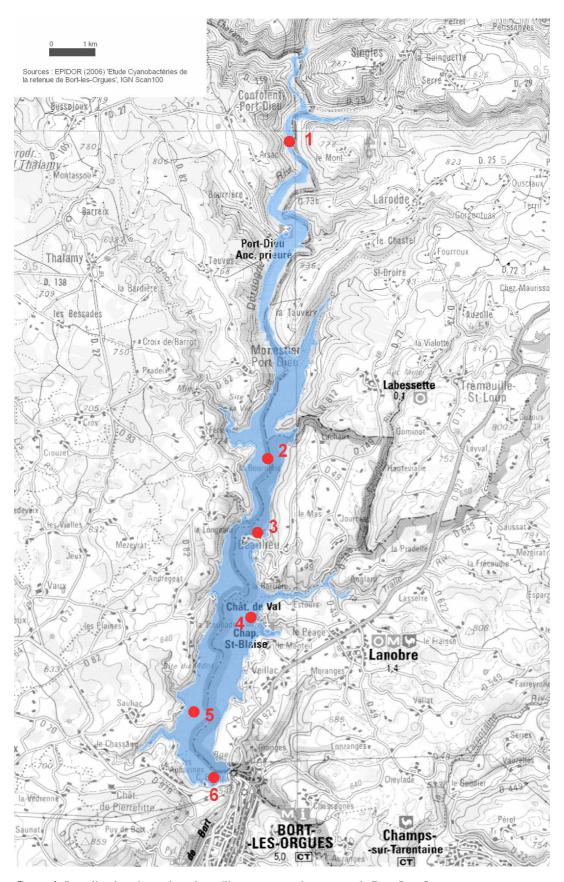
ans le nombre d'exploitations a diminué sur le territoire mais leur taille respective a augmenté. Des variations s'observent suivant les sous bassins : une déprise agricole sur le bassin du Chavanon et l'axe Dordogne et au contraire une reconquête sur le bassin de la Rhue (53% de la SAU totale de la Haute Dordogne). De plus, le territoire de la Haute Dordogne possède essentiellement des surfaces toujours en herbes sur lesquelles l'activité d'élevage est nettement développée (majoritairement de bovins). On déplore souvent des pratiques d'épandage mal adaptées. Le diagnostic agricole réalisé sur le territoire montre que 70% des exploitations fromagères ont une capacité de stockage inférieure à 4 mois. Les exploitants sont alors contraints d'épandre sur des terrains enneigés ou gelés et pendant les périodes de forte pluviométrie ce qui entraîne un acheminement direct d'éléments nutritifs vers les cours d'eau. Les apports diffus sont donc marginaux et il s'agit de mettre en œuvre des actions d'une part visant à cibler sur le territoire les sources majeures de production de phosphore et d'autre part de tenter de limiter ces rejets par de meilleures pratiques et une sensibilisation des acteurs.

IV. ETUDE DE LA RETENUE DE BORT LES ORGUES

IV.1. METHODOLOGIE

A. MISE EN PLACE DE LA STRATEGIE D'ECHANTILLONNAGE – POINTS ECHANTILLONNES

Dans le cadre de notre étude, six points de prélèvements ont été définis en fonction des caractéristiques géomorphologiques et hydrographiques de la retenue et de son bassin versant (Carte 4 et Annexe 1). Ainsi, des zones suspectées comme étant propices à la mise en place d'efflorescence ont été choisies: les anses, criques, points sous les vents dominants ou à l'aval des affluents.



Carte 4: Localisation des points de prélèvements sur la retenue de Bort Les Orgues.

De l'amont vers l'aval, les principales caractéristiques des 6 points sont les suivantes :

- Point 1 (≈ 12 m de profondeur): point localisé le plus en amont dans la retenue, à 18 km du barrage, en aval du pont d'Arpiat, ce point marque en fait le début de la retenue. Son intérêt est de se situer après la confluence de la Dordogne avec le Chavanon, la Mortagne et la Burande.
- Point 2 (≈ 52 m de profondeur): situé à 9 km du barrage, après la confluence avec le Dognon et le ruisseau du Rigaud.
- Point 3 (≈ 64 m de profondeur): situé à 7,1 km du barrage dans une crique.
- Point 4 (≈ 82 m de profondeur): situé à 4,8 km du barrage en aval de la confluence avec la Tialle.
- Point 5 (≈ 89 m de profondeur): situé à 2 km du barrage en aval de la confluence avec le Lys.
- Point 6 (≈ 95 m de profondeur): situé à 300 m du barrage, aux alentours du rejet de l'eau turbinée par l'usine de la Rhue.

Afin d'appréhender au mieux les variations temporelles dans la distribution des cyanobactéries, une veille visuelle a été mise en place dès le mois de mai de chacune des deux années d'étude (2006 et 2007), début de la période propice à leur développement. Cette veille a été réalisée par les surveillants des zones de baignades et le stagiaire d'EPIDOR. Cette action avait pour but d'identifier les zones privilégiées pour le déclenchement d'un bloom. Sur les deux années de suivi, des campagnes bimensuelles en début et fin de période de développement potentiel (juin et octobre) puis avec un pas de temps hebdomadaire en juillet, août et septembre ont été réalisées.

Par ailleurs, afin de tenir compte de la variabilité verticale de la distribution des cellules, des profils verticaux ont été effectués, à trois reprises, aux 6 points de prélèvement habituels et en des points intermédiaires (Annexe 1) à l'aide d'une sonde spectrofluorimétrique immergeable (Annexe 2), permettant de distinguer et de quantifier les grands groupes phytoplanctoniques présents dans la retenue, dont les cyanobactéries. Les premiers profils ont été effectués dès lors qu'une augmentation significative des cyanobactéries était observée (23/07/07). Les seconds correspondaient au pic de biomasse

phytoplanctonique (07/08/07) et les derniers à la fin de l'efflorescence (18/09/07). Le but étant de suivre spatialement et temporellement la mise en place d'une efflorescence.

B. VARIABLES ETUDIEES

Lors de chaque campagne, les prélèvements d'eau ont été effectués sous la surface. Les conditions climatiques du jour (météo, vent) et la cote de la retenue ont été relevées.

1) MESURES PHYSICO-CHIMIQUES

Pour chaque point de prélèvement, les paramètres suivants ont été relevés :

- la couleur et l'odeur de l'eau
- la température de l'air et de l'eau
- la transparence au disque de Secchi
- le pH
- la conductivité (en μS cm⁻¹)
- le taux de saturation en oxygène (en %)
- la concentration en oxygène dissous (en mg L⁻¹)

Des prélèvements d'eau ont été effectués pour mesurer les concentrations en phosphore total (NF EN 1189) et azote total (XP ENV 12260) ainsi que les formes dissoutes, ammonium (NF T90-015), nitrate (NF EN ISO 13395) et phosphate (NF EN 1189). Les limites de quantifications sont de 0,002 mg L⁻¹ pour les mesures d'ammonium, de phosphate et phosphore total et de 0,02 mg L⁻¹ pour les nitrates et l'azote total. Les différents dosages ont été effectués par l'équipe d'analyses physico-chimiques des eaux de l'INRA de Thonon.

2) MESURES BIOLOGIQUES

A chaque date d'échantillonnage :

- 300 à 500 mL d'eau ont été prélevés pour estimer la **biomasse phytoplanctonique**. Après filtration sur filtre GF/C (Whatman) et extraction au méthanol (Talling and Driver, 1963), la **concentration en chlorophylle** *a* (en μg L⁻¹) à été déterminée par spectrophotomètrie (Cary 50 Scan, Varian Inc., Palo Alto, USA). Pour chaque point, cette analyse a été réalisée en triplicat.

Rq: Une corrélation positive et significative existe entre les données de Chlorophylle a $(\mu g \ Chla \ L^{-1})$ obtenus après extraction au méthanol et celles obtenues par la sonde en μg équivalent Chla L^{-1} (eq. Chla = 0.62 x + 1.02; R^2 = 0.92; n = 37; P<10⁻⁴).

- 25 mL d'eau ont été concentré à l'aide d'un filet à plancton et fixés par du formol 5% de concentration finale (v/v) pour l'**identification des espèces phytoplanctoniques** selon Komarek and Anagnostidis (2005).
- 25 mL d'eau ont été prélevés et fixés par du formol 5% de concentration finale (v/v) pour **le comptage des cellules des espèces de cyanobactéries dominantes**. Les densités cellulaires ont été déterminées par méthode Utermöhl (Lund, 1951) en utilisant un microscope inversé Olympus CK2 (x 400, Olympus Optical Co, Tokyo, Japon). Pour chaque point, ces mesures ont été faites en duplicats.

Rq: Une corrélation positive et significative existe entre les comptages des espèces de cyanobactéries (cell mL^{-1}) et les biomasses de cyanobactéries obtenues par la sonde en μg équivalent Chla L^{-1} (eq. Chla = 0.0003 x + 1.42; R^2 = 0.82; n = 29; $P<10^{-4}$).

3) ETUDE DE LA TOXICITE POTENTIELLE

Estimation des concentrations en microcystines : Test biochimique d'inhibition de la protéine phosphatase 2a (PP2a)

A chaque date d'échantillonnage, 300 à 500 mL d'eau ont été prélevés et filtrés sur filtre Nucleopore 1 μm (Whatman). La concentration en microcystine (en μg équivalent MC-LR L⁻¹) dans les cellules est déterminée après extraction au méthanol 100% par un test biochimique d'inhibition de la protéine phosphatase de type 2A (Rivasseau *et al.*, 1999; Briand *et al.*, 2002). Ce test est basé sur la dégradation du *para*-nitrophenyl phosphate (incolore) en *para*-nitrophénol (jaune) par la PP2a. Cette réaction est inhibée en présence de microcystines et le pourcentage d'inhibition est mesuré *via* l'absorbance mesurée à 405 nm. Les concentrations en microcystines totales sont calculées à partir d'une gamme de calibration de standard de la MC-LR. Cette mesure est effectuée en duplicat et n'a été réalisée que pour les échantillons présentant une forte dominance d'espèces de cyanobactéries potentiellement hépatotoxiques.

Estimation des concentrations en saxitoxines : Test cellulaire sur neuroblastomes 2a (Neuro-2a)

300 à 500 mL d'eau ont été prélevés et filtrés sur filtre Nucleopore 1 µm (Whatman). Les filtres ont été extraits dans 5 mL de méthanol 50%/eau acidifiée (1/1, v/v), puis soniqués 5 min, centrifugés 10 min à 4000 rpm puis le surnageant a été filtré sur filtre 0.20 µm avant d'être testés pour leur contenu en saxitoxines par un test cellulaire sur neuroblastomes de souris riches en canaux sodium voltage dépendants, cibles des saxitoxines (Manger et al., 1995 ; Humpage et al., 2007). Ce test permet d'observer des variations de la viabilité des cellules Neuro-2a en présence d'ouabaïne qui inhibe les pompes sodium/potassium et de vératridine, qui provoque un flux entrant d'ions sodium dans la cellule. Ce couple de toxines induit l'accumulation de Na⁺ dans la cellule, augmente la pression osmotique intracellulaire et provoque l'éclatement des cellules, donc leur mort. En présence de saxitoxines bloquant les canaux sodium, l'effet de la vératridine est inhibé, ce qui a pour conséquence la survie des cellules. C'est la mesure de la survie des cellules via une méthode colorimétrique qui permet la quantification de saxitoxines présentes dans l'échantillon. Cette mesure n'a été réalisée que pour les échantillons présentant une forte dominance d'espèces de cyanobactéries connues pour produire potentiellement des saxitoxines.

4) Presence d'Anatoxine-a

300 à 500 mL d'eau ont été prélevés et filtrés sur filtre Nucleopore 1 µm (Whatman). Les filtres ont été extraits dans 5 mL de méthanol 50%/eau acidifiée (1/1, v/v), puis soniqués 5 min, centrifugés 10 min à 4000 rpm puis le surnageant a été filtré sur filtre 0.20 µm avant d'être analysé en spectrométrie de masse. Les spectres de masse ont été réalisés sur un spectromètre de masse quadripole temps de vol (Q-Star Pulsar i Applied Biosystem) équipé d'une source d'ionisation à électrospray selon le protocole décrit par Gugger *et al.* (2005). La recherche d'anatoxine-a n'a été réalisée que pour les échantillons présentant une forte dominance d'espèces de cyanobactéries connues pour produire potentiellement de l'anatoxine-a.

C. ANALYSES STATISTIQUES

1) ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode mathématique d'analyse de données qui va chercher à représenter au mieux dans un espace réduit (un plan), des objets qui sont décrits par un grand nombre de variables définissant un espace multidimentionnel. Cette analyse permet donc d'étudier les relations de proximité entre ces objets et la contribution des diverses variables à cette structuration. Elle a été réalisée à l'aide du logiciel ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

2) MULTIDIMENSIONAL SCALING

Le Multidimensional Scaling (MDS) est une méthode d'analyse multivariée descriptive, qui permet de "projeter" dans un espace métrique, une matrice ordinale indiquant les proximités (ou similarités) d'objets deux à deux, tout en conservant le plus exactement possible l'ordre des proximités d'objets. Le calcul du stress de Kruskal permet de rendre compte de la fiabilité d'une représentation issue d'un MDS. Un coefficient de "stress" (ou d'éloignement) est calculé entre la série des distances euclidiennes établi entre les objets (distances croissantes, égales ou décroissantes) et la série de référence correspondante (monotonique = distances croissantes ou égales). Si le coefficient est égal à 0, il y aura une correspondance parfaite entre les deux séries, et les proximités sur la représentation graphique exprimeront la matrice initiale des rangements. Cette analyse a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT.

IV.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

A. Annee 2006

La présente partie reprend et synthétise les données qui ont été acquises en 2006 dans le cadre de l'étude. Les conditions météorologiques lors des campagnes de prélèvements sur la retenue de Bort Les Orgues sont exposées dans le tableau 2.

	28/06/06	11/07/06	25/07/06	01/08/06	08/08/06	16/08/06	23/08/06	30/08/06	12/09/06	03/10/06
climatologie du jour	humide	sec ensoleillé	sec ensoleillé	humide	humide	sec couvert	sec ensoleillé - pluie	humide couvert	sec ensoleillé	pluie
climatologie semaine précédente	couvert avec orages	sec couvert	sec ensoleillé	sec couvert	sec couvert	sec couvert	sec couvert	sec couvert - pluie	sec ensoleillé	humide
Vent (direction)	faible	faible	faible	fort	fort (N-	faible	faible	faible	faible	Très fort
Veni (direction)	(O-SO)	(NO-NE)	(SO-N)	(SO)	NE)	(S-SO)	(SO)	(NO-NE)	(S-SE)	(SO)
Odeur	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Coloration	non	non	non	non	non	non	non	non	non	non
Heures de prélèvement	10-13h	10-13h	9-13h	9-13h	9-12h	9-13h	9-12h	9-12h	9-12h	9-12h
Cote de la retenue (NGF)	529,5	530,4	529,9	528,3	528,2	528,2	529,2	530,2	529,2	534.1

Tableau 2: Conditions de prélèvement lors des différentes campagnes réalisées sur la retenue de Bort Les Orgues en 2006. Vent faible : <4,5 m s⁻¹ ; Vent fort : [4,5-8] m s⁻¹ ; Vent très fort : > 8 m s⁻¹

1) CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA RETENUE

Les valeurs des paramètres physico-chimiques (température de l'eau, transparence, concentrations en oxygène dissous, pH et conductivité) caractérisant la surface du plan d'eau, sont présentées sur les figures 1 à 5.

Les températures de l'eau aux 6 stations suivent la même évolution et ne présentent pas de différences significatives en fonction des points considérés : un maximum de 26,5°C est observé fin juillet puis une lente diminution jusqu'à 16,7°C début octobre.

La transparence de l'eau moyenne sur la retenue pendant la période d'étude est d'environ 400 cm. Cependant, elle est plus faible au point 1 pendant tout l'été (min : 140 cm ; max : 350 cm) et sur tous les points à la fin juin (170 cm).

La concentration en oxygène dissous est convenable en surface (moy : 8.9 mg L^{-1}) sauf au point 6 le 28/06/06 (6.1 mg L^{-1}) et aux points 1 et 2 le 11/07/06 ($4.9 \text{ et } 5.9 \text{ mg L}^{-1}$ respectivement).

On remarque également les fortes valeurs de pH (> 8) en juin, juillet et septembre et des valeurs de pH généralement plus élevées au point 1.

La conductivité de l'eau varie de 57 à 78 µS cm⁻¹ (moyenne de 68 µS cm⁻¹) sur l'ensemble des campagnes. Ces valeurs assez peu élevées traduisent une faible minéralisation, liée à la nature du bassin versant cristallin.

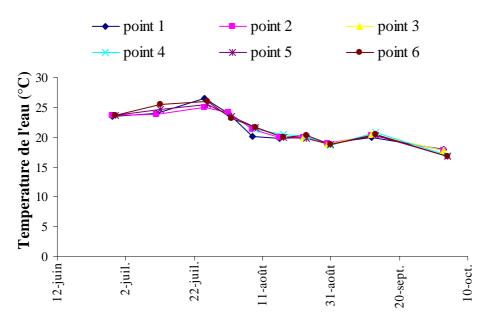


Figure 1: Mesures de la température de l'eau (°C) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2006.

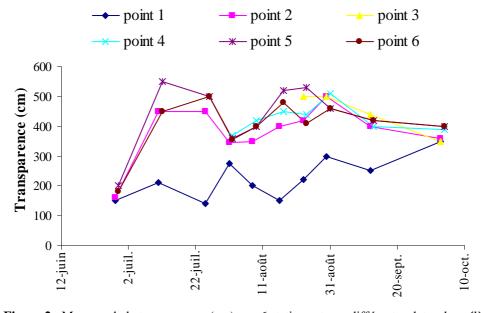


Figure 2 : Mesures de la transparence (cm) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2006.

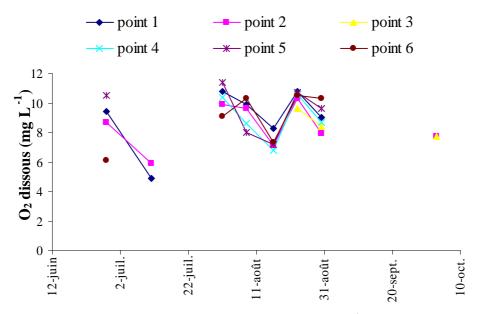


Figure 3: Mesures des concentrations en oxygène dissous (mg L⁻¹) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2006.

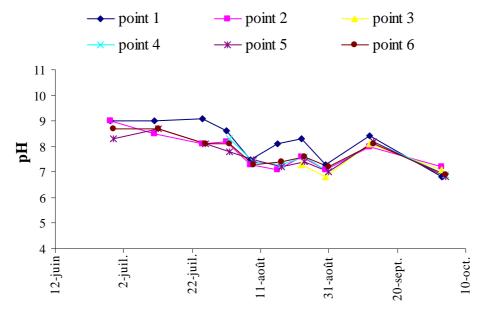


Figure 4 : Mesures de pH aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2006.

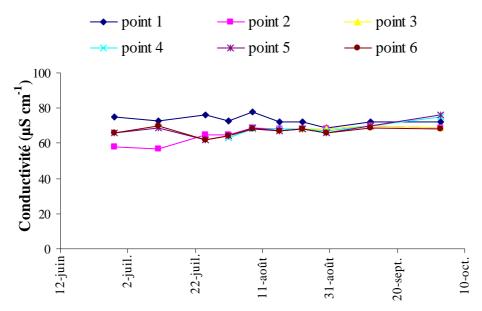


Figure 5: Mesures de la conductivité (μ S cm⁻¹) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2006.

Les données de concentrations en éléments nutritifs, ont été interprétées sur la base des grilles de classification établie par l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OECD, 1982; Annexe 3) pour les données N et P total et celles de qualité du SEQ Eau (Interagences de l'eau, 2003; Annexe 4) pour les autres paramètres chimiques (NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄³-). Cependant ces dernières ne doivent être considérées qu'à titre indicatif. En effet, ces grilles ont été établies pour les cours d'eau, et leur utilisation pour l'analyse des données relatives aux plans d'eau s'en trouve ainsi parfois inadaptée tant les fonctionnements de ces deux types de systèmes aquatiques sont différents.

Les concentrations en N et P total (Tableaux 3 et 4), qui sont des indices de la qualité trophique d'un plan d'eau, sont très fortes pour le paramètre N et caractéristiques d'un milieu eutrophe voire hypereutrophe. Les valeurs en P total caractérisent l'ensemble du plan d'eau comme mésotrophe sauf au niveau du point 1 qui apparaît plus eutrophe.

Ntot (mg N L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
28/06/2006	1,11	1,13			1,05	0,75
11/07/2006		<u> </u>		_	,	
25/07/2006	0,37	0,49			0,43	1,37
01/08/2006	0,65	0,53		0,49	0,48	0,46
08/08/2006	0,69	0,6		0,62	0,65	0,53
16/08/2006	0,68	0,52		0,49	0,56	0,52
23/08/2006	0,66_	0,82	0,56	0,52	0,72_	0,72
30/08/2006	1,19	1,15_	1,31	1,15_	1,89	1,19_
12/09/2006	0,54	0,84	0,62	0,73	0,58	0,93
03/10/2006	0,67	0,64	0,58	0,61	0,65	0,64

Tableau 3: Concentrations en azote total (mg N L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2006. Code couleur (OECD, 1982; Annexe 3):

<0,35	mésotrophe	0,35 - 0,65	eutrophe	0,65 - 1,2	hypereutrophe
-------	------------	-------------	----------	------------	---------------

Ptot (mg P L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
28/06/2006	0,01	0,024			0,007	0,025
11/07/2006	0,02	0,01			0,01	0,013
25/07/2006	0,054	0,067			0,015	0,013
01/08/2006	0,013	0,005		0,003	0,009	0,012
08/08/2006	0,047	0,005		0,008	0,014	0,005
16/08/2006	0,064	0,01		0,011	0,011	0,002
23/08/2006	0,04	0,017	0,015	0,016	0,012	0,022
30/08/2006	0,031	0,011	0,012	0,015	0,013	0,017
12/09/2006	0,039	0,017	0,01	0,01	0,011	0,021
03/10/2006	0,021	0,013	0,017	0,015	0,021	0,015

Tableau 4: Concentrations en phosphore total (mg P L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2006. Code couleur (OECD, 1982; Annexe 3):

<0,01 oligotrophe 0,01 - 0,035 mésotrophe 0,035 - 0,1 eutrophe >0,1 hypereutrophe

Les concentrations en éléments dissous (ammonium, nitrate et phosphate ; Tableaux 5, 6 et 7) restent faibles sur toute la période d'étude et homogènes d'amont en aval. Les faibles concentrations de ces formes dissoutes par rapport à celles de l'N et du P total suggèrent qu'elles sont majoritairement « consommées » par la biomasse phytoplanctonique. Les concentrations en phosphate sont souvent en dessous de la limite de quantification (< 0,002 mg P L⁻¹). Le phosphore pourrait donc être le principal facteur contrôlant la biomasse phytoplanctonique dans la retenue.

N-NH ₄ ⁺						
(mg N L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
28/06/2006	0,011	0,01			0,004	0,014
11/07/2006	0,075	0,085			0,081	0,103
25/07/2006	0,13	0,029			0,019	0,021
01/08/2006	0,058	0,019		0,011	0,013	0,019
08/08/2006	0,041	0,015		0,016	0,078	0,025
16/08/2006	0,076	0,025		0,082	0,03	0,041
23/08/2006	0,074	0,054	0,111	0,045	0,021	0,038
30/08/2006	0,104	0,059	0,106	0,085	0,012	0,049
12/09/2006	0,041	0,031	0,02	0,013	0,014	0,034
03/10/2006	0,011	0,003	0,004	0,004	0,049	0,006

Tableau 5 : Concentrations en ammonium (mg N L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2006. Code couleur (Interagences de l'eau, 2003 ; Annexe 4) :

<0,08	excellente	0,08-0,4	bonne	0,4-1,6	passable	1,6-6	médiocre
-------	------------	----------	-------	---------	----------	-------	----------

N-NO ₃ (mg N L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
28/06/2006	0,36	0,46			0,81	0,5
11/07/2006	0,21	0,26			0,25	0,21
25/07/2006	0,14	0,42			0,37	0,34
01/08/2006	0,38	0,37		0,36	0,39	0,38
08/08/2006	0,51	0,5		0,44	0,46	0,42
16/08/2006	0,46	0,47		0,47	0,49	0,45
23/08/2006	0,38	0,44	0,42	0,43	0,46	0,47
30/08/2006	0,38	0,5	0,51	0,53	0,48	0,49
12/09/2006	0,33	0,4	0,42	0,4	0,4	0,42
03/10/2006	0,58	0,54	0,5	0,55	0,56	0,54

Tableau 6 : Concentrations en nitrate (mg N L^{-1}) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2006. Code couleur (Interagences de l'eau, 2003 ; Annexe 4) :

<1,1	excellente	1,1 - 5,6	bonne	5,6 - 11,3	passable	11,3 - 22,6	médiocre

P-PO ₄ ³⁻ (mg P L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
28/06/2006	0,002	0,004			0,003	< LDQ
11/07/2006	0,002	< LDQ			0,027	< LDQ
25/07/2006	0,011	0,006			0,006	0,002
01/08/2006	0,002	< LDQ		< LDQ	< LDQ	< LDQ
08/08/2006	0,009	0,001		< LDQ	0,002	< LDQ
16/08/2006	0,019	0,002		0,002	0,002	0,002
23/08/2006	0,008	0,002	0,002	0,002	< LDQ	< LDQ
30/08/2006	0,005	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002
12/09/2006	0,007	0,004	0,003	0,003	0,003	0,006
03/10/2006	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003

Tableau 7: Concentrations en phosphate (mg P L^{-1}) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2006. LDQ : limite de quantification (< 0,002 mg P L^{-1}). Code couleur (Interagences de l'eau, 2003 ; Annexe 4) :

2) CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DE LA RETENUE

Les données de concentrations en chlorophylle *a* (Tableau 8), indicatrices de la biomasse phytoplanctonique totale, ont été interprétées sur la base des grilles de classification établie par l'OECD (1982 ; Annexe 3).

Les concentrations en Chla sont globalement faibles sur toute la retenue pendant la période d'étude, exceptée au point 1, où la biomasse phytoplanctonique est plus élevée et caractéristique d'un milieu mésotrophe voir eutrophe.

La biomasse phytoplanctonique était essentiellement constituée d'une espèce de Diatomée, *Fragilaria crotonensis* (Annexe 5). L'abondance de cette espèce, typique des lacs eutrophes, montre la fragilité du plan d'eau. La proportion de cyanobactéries identifiées lors des différentes campagnes est restée extrêmement faible (<10%). Ainsi, aucune analyse de toxines n'a été réalisée.

Chla						
(μg L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
28/06/2006	$22,14 \pm 3,4$	$14,64 \pm 1,1$			$9,56 \pm 0,6$	$9,37 \pm 1,9$
11/07/2006	$5,32 \pm 0,4$	$4,56 \pm 0,8$			$1,52 \pm 0,3$	$1,57 \pm 0,3$
25/07/2006	$24,3 \pm 7,4$	$5,04 \pm 0,4$			$6 \pm 0,1$	$4,67 \pm 1,1$
01/08/2006	$19,05 \pm 1$	$8,07 \pm 0,4$		$7,4 \pm 0,5$	$6,59 \pm 0,4$	$7,32 \pm 0,7$
08/08/2006	$28,51 \pm 1,4$	$8,45 \pm 1$		$5,92 \pm 0,2$	$5,88 \pm 0,3$	$6,09 \pm 0,6$
16/08/2006	$81,02 \pm 5,8$	$6,15 \pm 0,4$		$4,71 \pm 0,7$	$4,51 \pm 0,9$	$4,91 \pm 0,6$
23/08/2006	$17,19\pm 2,3$	$5,86 \pm 0,6$	$5,28 \pm 0,3$	$6,14 \pm 0,1$	$6,01 \pm 0,8$	$5,05 \pm 1$
30/08/2006	$12,78 \pm 1,6$	$5,62 \pm 1$	$5,08 \pm 0,7$	$5,44 \pm 0,4$	$6,44 \pm 1$	$6,51 \pm 0,4$
12/09/2006	$26,63 \pm 1,5$	$5,91 \pm 0,2$	$5,54 \pm 0,4$	$6,89 \pm 0,4$	$5,23 \pm 0,1$	$6,84 \pm 0,4$
03/10/2006	$7,69 \pm 0,5$	$7,40 \pm 0,7$	$8,55 \pm 0,5$	$7,77 \pm 1,1$	$4,41 \pm 0,6$	$6,48 \pm 0,6$

Tableau 8: Concentrations en chlorophylle a (µg Chla L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2006. \pm : écart type. Code couleur (OECD, 1982; Annexe 3): <10 oligotrophe 10 - 35 mésotrophe 35 - 100 eutrophe >100 hyr

<10 oligotrophe 10 - 35 mésotrophe 35 - 100 eutrophe >100 hypereutrophe

3) Conclusion 2006

Les mesures effectuées sur la retenue durant la période estivale de l'année 2006 révèlent un gradient trophique entre l'amont et l'aval de la retenue. En effet, l'amont de la retenue (essentiellement au point 1) présente de plus fortes concentrations en azote total, phosphore total et chlorophylle a, associées à des valeurs de pH plus basiques et des transparences de l'eau plus faibles. Ces différents paramètres sont caractéristiques de milieux eutrophes alors que le niveau trophique aux autres points de la retenue est plutôt caractérisé comme mésotrophe. La biomasse phytoplanctonique est dominée par une Diatomée (*Fragilaria*

crotonensis), typique des milieux eutrophes.

Cette première année d'étude est marquée par l'absence de proliférations à cyanobactérie sur toute la retenue alors que, lors des années précédentes (2004 et 2005), des efflorescences à Microcystis aeruginosa avaient conduit à une interdiction d'accès aux plages. Cette absence de prolifération en 2006 pourrait s'expliquer par la réalisation d'une vidange partielle durant l'hiver 2005. En effet, des études préalables sur cette retenue, réalisées avant et après la vidange partielle de 1995 (Brigault, 1998; Ruban et al., 1999), avaient mis en évidence une amélioration sensible de la qualité des eaux qui étaient passées d'un état eutrophe à un état mésotrophe suite à cet évènement. Cependant, si cette étude soulignait également la forte dominance de Fragilaria crotonensis (92,9% de la communauté phytoplanctonique, Brigault, 1998) elle évoquait aussi la présence de cyanobactéries, Anabaena spiroides et Aphanocapsa sp. (respectivement 6,1% et 4,6% de la biomasse phytoplanctonique) en août 1997. Ainsi, cette étude mettait en évidence le caractère instable et fragile de la retenue, capable de changements rapides et un effet bénéfique temporaire de la vidange sur la qualité du plan d'eau. L'absence de données physico-chimiques et biologiques de la retenue avant la mise en place de la vidange en 2005 ne nous permet pas de comparer les niveaux trophiques de la retenue. Néanmoins, des suivis des affluents au niveau des paramètres de l'eutrophisation pendant trois années consécutives, encadrant la vidange partielle (EPIDOR, 2004 ; 2005 ; 2006), ont montré des flux en nutriments importants provenant en grande partie de l'amont de la retenue (Chavanon et Dordogne). Ces informations, qui restent à être confirmées, laisseraient supposer que si de nouvelles efflorescences à cyanobactéries devaient se développer sur le site, elles le feraient probablement à partir de l'amont de la retenue.

B. Annee 2007

La présente partie reprend et synthétise les données qui ont été acquises en 2007 dans le cadre de l'étude. Les conditions météorologiques lors des campagnes de prélèvements sur la retenue de Bort Les Orgues sont exposées dans le tableau 9.

	27/06/2007	11/07/2007	18/07/2007	23/07/2007	25/07/2007	01/08/2007	07/08/2007	13/08/2007
climatologie du jour	couvert et humide	couvert avec éclaircies	couvert avec éclaircies	couvert	couvert et pluvieux	sec ensoleillé	couvert et pluvieux	couvert et humide
climatologie semaine précédente	couvert avec orages	couvert et pluvieux	sec ensoleillé	pluie/beau temps	pluie/beau temps	pluie/beau temps	pluie/beau temps	pluie/beau temps
Vent	faible	faible	faible	fort	faible	fort	faible	faible
(direction)	(SO)	(SO)	(NO-NE)	(SO)	(SO)	(NE-S)	(N-NO-SE)	(SO)
Odeur	non	non	non	non voile en	non	non	non	non
Coloration	non	non	non	surface (point 6)	non	non	non	non
Heures de prélèvement	10-12h	9-11h	10-12h	9h-15h	10-12h	9-11h	9h-17h	10-12h
Cote de la retenue (NGF)	532,4	537,2	537,3	534,8	534,8	531,6	532,4	533

	21/08/2007	28/08/2007	04/09/2007	11/09/2007	18/09/2007	02/10/2007
climatologie du jour	couvert avec éclaircies	couvert et pluvieux				sec ensoleillé
climatologie semaine précédente	froid et pluvieux	pluie/beau temps	pluie/beau temps		orage et pluie	froid/beau temps
Vent	faible	faible	fort	fort	fort	faible
(direction)	(NO-SO)	(N-NO-SO-SE)	(NO-NE)	(N-NE)	(NO-NE)	(SO)
Odeur	non	non	non	non	non	non
Coloration	non	non	non	non	non	non
Heures de prélèvement	10-12h	9-11h	9-12h	10-13h	10-16h	10-12h
Cote de la retenue (NGF)	534,2	536,2	538			

Tableau 9 : Conditions de prélèvement lors des différentes campagnes réalisées sur la retenue de Bort Les Orgues en 2007. Vent faible : $<4,5 \text{ m s}^{-1}$; Vent fort : $[4,5-8] \text{ m s}^{-1}$; Vent très fort : $> 8 \text{ m s}^{-1}$

1) CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA RETENUE

Les valeurs des paramètres physiques (température de l'eau, transparence, concentrations en oxygène dissous, pH et conductivité) caractérisant la surface du plan d'eau, sont présentées sur les figures 6 à 10.

Les températures de l'eau en surface sont en moyenne plus faibles que celles de l'année 2006 (moy : 18.9°C, min : 15,4°C et max : 22,7°C).

La transparence de l'eau est plus faible que lors de l'année 2006 (moy : 260 cm) et les moyennes minimales (160 cm) sont observées au mois d'août.

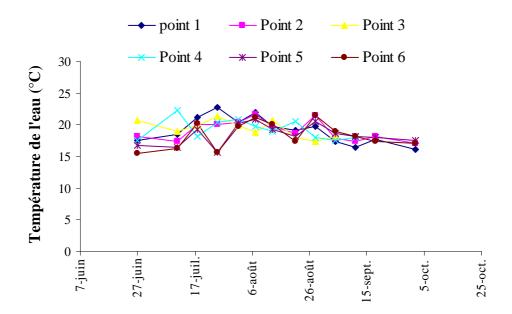


Figure 6 : Mesures de la température de l'eau (°C) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2007.

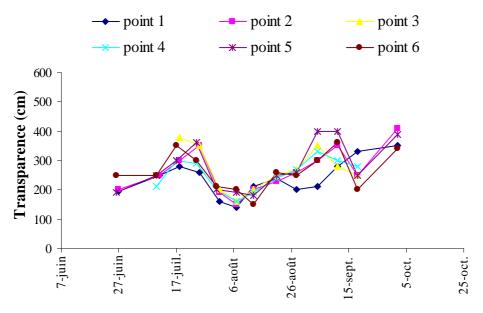


Figure 7 : Mesures de la transparence (cm) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2007.

La surface de l'eau est relativement plus oxygénée que l'année précédente (moy : 9,4 mg L⁻¹). Les moyennes maximale (11,3 mg L⁻¹) et minimale (8,1 mg L⁻¹) sont observées respectivement au mois d'août et septembre.

Issues d'un bassin versant cristallin, les eaux de la retenue sont faiblement minéralisées et la conductivité moyenne est sensiblement la même qu'en 2006 (71 µS cm⁻¹) et un pH moyen de 8,1 avec des extrêmes de 6,9 et 9,8 observées respectivement au mois de septembre et au mois d'août.

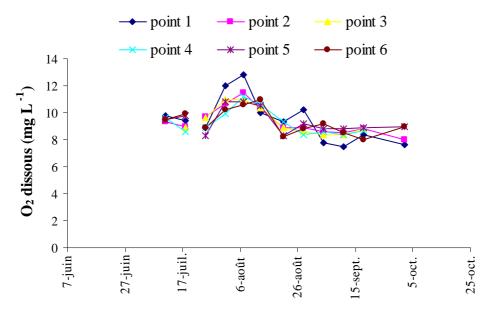


Figure 8: Mesures des concentrations en oxygène dissous (mg L⁻¹) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2007.

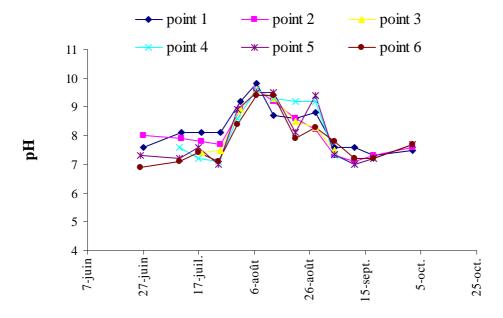


Figure 9 : Mesures de pH aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2007.

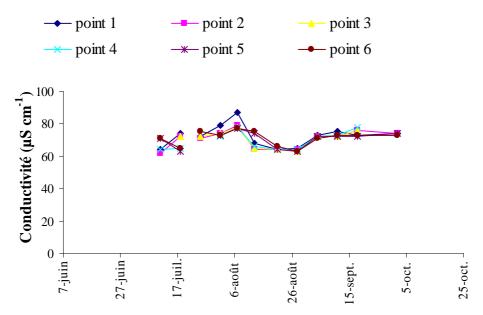


Figure 10 : Mesures de la conductivité (μS cm⁻¹) aux 6 stations et aux différentes dates de prélèvement en 2007.

Les concentrations en éléments nutritifs des eaux de surface de la retenue sont voisines de celles observées pour la même période en 2006. Les teneurs moyennes des eaux de la retenue en N et P total restent fortes et caractéristiques d'un milieu eutrophe (Tableaux 10 et 11). Les formes dissoutes sont en faibles quantités et donc majoritairement consommées par la biomasse phytoplanctonique (Tableaux 12, 13 et 14).

Ntot (mg N L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
27/06/2007	0,7	0,65			0,73	0,69
11/07/2007	0,91	0,98		0,88	0,91	0,88
18/07/2007	0,47	0,49	0,56	0,57	0,69	0,58
23/07/2007						_
25/07/2007	0,51	0,57	0,52	0,49	0,52	0,61
01/08/2007	0,62	0,6	0,81	0,72	0,73	0,79
07/08/2007	0,5	0,41	0,39	0,43	0,43	0,61
13/08/2007	0,62	0,46	0,44	0,43	0,52	0,35
21/08/2007	0,66	0,5	0,59	0,55	0,69	0,78
28/08/2007	0,22	0,21	0,33	0,21	0,24	0,23
04/09/2007	0,82	0,64	0,63	0,64	0,69	0,7_
11/09/2007	0,8	0,64	0,63	0,58	0,57	0,63
18/09/2007	0,66	0,6	0,65	0,61	0,62	0,61
02/10/2007	0,7	0,62			0,66	0,61

Tableau 10: Concentrations en azote total (mg N L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2007. Code couleur (OECD, 1982; Annexe 3):

<0,35 mésotrophe 0,35 - 0,65 eutrophe 0,65 - 1,2 hypereutrophe</p>

Ptot (mg P L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
27/06/2007	0,013	0,009			0,01	0,011
11/07/2007	0,026	0,007		0,022	0,02	0,022
18/07/2007	0,031	0,018	0,023	0,015	0,017	0,021
23/07/2007		•	,	, ,	ŕ	
25/07/2007	0,01	0,015	0,012	0,01	0,009	0,021
01/08/2007	0,028	0,023	0,027	0,017	0,028	0,023
07/08/2007	0,04	0,018	0,021	0,008	0,01	0,026
13/08/2007	0,03	0,02	0,008	0,018	0,01	0,009
21/08/2007	0,009	0,017	0,018	0,007	0,007	0,007
28/08/2007	0,025	0,013	0,01	0,011	0,008	0,014
04/09/2007	0,015		0,017	0,005	0,005	0,008
11/09/2007	0,009	0,007	0,013	0,014	0,014	0,013
18/09/2007	0,067	0,014	0,006	0,006	0,002	0,007
02/10/2007	0,018	0,017			0,012	0,009

Tableau 11: Concentrations en phosphore total (mg P L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2007. Code couleur (OECD, 1982 ; Annexe 3) :

< 0,01	oligotrophe	0,01 - 0,035	mésotrophe	0,035 - 0,1	eutrophe	>0,1	hypereutrophe
--------	-------------	--------------	------------	-------------	----------	------	---------------

N-NH ₄ ⁺						
(mg N L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
27/06/2007	0,026	0,011			0,01	0,016
11/07/2007	0,013	0,016		0,015	0,018	0,017
18/07/2007	0,024	0,019	0,023	0,019	0,022	0,027
23/07/2007						
25/07/2007	0,025	0,042	0,002	0,017	0,008	0,011
01/08/2007	0,003	0,013	0,021	0,005	0,01	0,023
07/08/2007	0,012	0,014	0,017	0,012	0,012	0,065
13/08/2007	0,006	0,008	0,007	0,019	0,025	0,021
21/08/2007	0,03	0,012	0,015	0,01	0,023	0,026
28/08/2007	0,069	0,072	0,028	0,037	0,034	0,031
04/09/2007	0,052	0,038	0,024	0,026	0,02	0,034
11/09/2007	0,012	0,015	0,016	0,068	0,019	0,037
18/09/2007	0,104	0,02	0,021	0,02	0,002	0,017
02/10/2007	0,02	0,005			0,046	0,003

Tableau 12 : Concentrations en ammonium (mg N L^{-1}) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2007. Code couleur (Interagences de l'eau, 2003 ; Annexe 4) :

<0,08 excellente 0,08-0,4 bonne 0,4-1,6 passable 1,6-6 médiocre

N-NO ₃						
(mg N L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
27/06/2007	0,47	0,46			0,47	0,52
11/07/2007	0,31	0,35		0,34	0,37	0,34
18/07/2007	0,27	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36
23/07/2007						
25/07/2007	0,37	0,38	0,38	0,38	0,5	0,47
01/08/2007	0,34	0,3	0,3	0,35	0,33	0,33
07/08/2007	0,09	0,14	0,15	0,15	0,15	0,17
13/08/2007	0,46	0,17	0,15	0,14	0,12	0,1
21/08/2007	0,23	0,2	0,2	0,15	0,28	0,36
28/08/2007	0,21	0,23	0,22	0,21	0,22	0,2
04/09/2007	0,42	0,29	0,26	0,24	0,21	0,24
11/09/2007	0,58	0,46	0,42	0,39	0,38	0,38
18/09/2007	0,47	0,42	0,4	0,4	0,41	0,44
02/10/2007	0,51	0,5			0,51	0,58

Tableau 13: Concentrations en nitrate (mg N L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2007. Code couleur (Interagences de l'eau, 2003 ; Annexe 4) :

<1,1	excellente	1,1 - 5,6	bonne	5,6 - 11,3	passable	11,3 - 22,6	médiocre
------	------------	-----------	-------	------------	----------	-------------	----------

P-PO ₄ 3-						
(mg P L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
27/06/2007	0,004	0,002			0,002	0,003
11/07/2007	0,007	< LDQ		0,007	0,009	0,007
18/07/2007	0,005	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004
23/07/2007						
25/07/2007	0,002	0,005	0,002	0,002	0,003	0,004
01/08/2007	0,01	0,006	0,006	0,006	0,007	< LDQ
07/08/2007	0,014	0,01	0,013	< LDQ	0,002	0,011
13/08/2007	0,008	0,01	< LDQ	0,011	< LDQ	0,003
21/08/2007	0,002	0,006	0,007	< LDQ	< LDQ	< LDQ
28/08/2007	0,007	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003
04/09/2007	0,003	0,007	< LDQ	0,006	0,005	0,003
11/09/2007	0,003	< LDQ	0,002	0,002	0,002	0,002
18/09/2007	< LDQ	0,003	< LDQ	< LDQ	0,003	0,015
02/10/2007	0,002	0,003			0,002	< LDQ

Tableau 14: Concentrations en phosphate (mg P L^{-1}) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2007. LDQ: limite de quantification (< 0,002 mg P L^{-1}). Code couleur (Interagences de l'eau, 2003; Annexe 4):

<0,065 excellente 0,065 - 0,16 bonne 0,16 - 0,326 passable 0,326 - 1,63 médiocre

2) CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES DE LA RETENUE

Biomasse phytoplanctonique totale

Les concentrations en chlorophylle *a* (Tableau 15) des eaux de surface de la retenue augmentent pendant l'été et atteignent leur maximum début août (de 28,90 µg L⁻¹ au point 6 à 49,90 µg L⁻¹ au point 1) caractérisant le plan d'eau de mésotrophe à eutrophe. Un gradient est observé entre l'amont et l'aval. En effet, le point 1 présente toujours les concentrations en chlorophylle *a* les plus élevées et celles du point 6 sont souvent les plus faibles.

Chla (µg L ⁻¹)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
27/06/2007	$27,51 \pm 1,2$	$26,41 \pm 0,6$			$22,43 \pm 2$	$10,11 \pm 0,5$
11/07/2007	$11,52 \pm 0,9$	$8,98\pm 2$		$7,39 \pm 0,4$	$6,12 \pm 0,4$	$5,56 \pm 0,3$
18/07/2007	$15,78 \pm 0,8$	$6,41 \pm 0,3$	$7,44 \pm 0,2$	$6,15 \pm 0,5$	$5,01 \pm 0,6$	$7,89 \pm 0,2$
23/07/2007	$26,58 \pm 0,08$	$9,70\pm0,06$	$10,38 \pm 0,3$	$11,50 \pm 0,03$	$12,42 \pm 0,02$	$8,97 \pm 0,02$
25/07/2007	$13,23 \pm 0,8$	$8,21 \pm 0,9$	$9,63 \pm 0,4$	$9,99 \pm 0,6$	$2,42 \pm 0,7$	$4,5 \pm 0,1$
01/08/2007	$29,71 \pm 0,6$	$23,17\pm 1$	$25,82 \pm 1,7$	$17,78 \pm 0,6$	$20,82 \pm 0,9$	$20,17 \pm 3,3$
07/08/2007	$49,92 \pm 0,02$	$33,34\pm0,05$	$36,66 \pm 0,03$	$36,87 \pm 0,03$	$34,34 \pm 0,02$	$28,84 \pm 0,03$
13/08/2007	$19,85 \pm 0,02$	$25,37 \pm 0,06$	$22,54 \pm 0,04$	$24,94 \pm 0,0$	$31,48 \pm 0,04$	$25,66 \pm 0,05$
21/08/2007	$43,38 \pm 8,4$	$15,17 \pm 1,4$	$17,69 \pm 0,8$	$12,85 \pm 0,5$	$12,16 \pm 0,1$	$12,05 \pm 1,7$
28/08/2007	$19,44 \pm 2,1$	$6,22 \pm 0,2$	$8,64 \pm 0,8$	$7,41 \pm 0,6$	$8,1 \pm 1,0$	$8,2 \pm 0,1$
04/09/2007	$8,97 \pm 0,4$	$6,94 \pm 0,3$	$6,36 \pm 0,1$	$8,11 \pm 0,2$	$7,92 \pm 0,2$	$11,13 \pm 0,4$
11/09/2007	$6,29 \pm 0,4$	$7,46 \pm 0,4$	$6,13 \pm 0,3$	$5,53 \pm 0,1$	$5,21 \pm 0,0$	$3,73 \pm 0,4$
18/09/2007	$5,11 \pm 0,2$	$4,36 \pm 0,1$	$4,02 \pm 0,3$	$4,27 \pm 0,4$	$5,92 \pm 1,5$	$3,57 \pm 0,2$
02/10/2007	$7,68 \pm 1,6$	$3,66 \pm 0,8$			$4,04 \pm 0,5$	$3,75 \pm 0,4$

Tableau 15: Concentrations en chlorophylle a (µg Chla L⁻¹) aux 6 stations d'échantillonnage pendant la période d'étude en 2007. \pm : écart type. Code couleur (OECD, 1982; Annexe 3):

10 oligotrophe
10 - 35 mésotrophe
35 - 100 eutrophe
>100 hypereutrophe

Espèces phytoplanctoniques présentes

Trois espèces phytoplanctoniques contribuent principalement à la biomasse chlorophylienne totale. Il s'agit de la diatomée, *Fragilaria crotonensis* (Annexe 5) et de deux espèces de cyanobactéries : *Aphanizomenon flos-aquae* et *Anabaena flos-aquae* (Annexes 6 et 7). Cependant, la présence, en faible quantité, de la cyanobactérie *Microcystis aeruginosa* a été observée dans les prélèvements à la mi-août jusqu'au début du mois de septembre.

Evolution horizontale et temporelle des principales espèces phytoplanctoniques

Les cyanobactéries, représentées par Aphanizomenon flos-aquae et Anabaena flos-aquae,

ont commencé à présenter des biomasses significatives au sein de la communauté phytoplanctonique vers la fin du mois de juillet. A cette période, l'échantillonnage sur le plan horizontal de la retenue a permis de mettre en évidence un gradient amont/aval de la biomasse de chacune des 2 espèces (Figure 11). Au sein des cyanobactéries, *Aphanizomenon flos-aquae* dominait alors l'amont de la retenue (4,10 eq. μg Chla L⁻¹ et 9,6 10³ cellules mL⁻¹ au point 1) alors qu'*Anabaena flos-aquae* était présente surtout à l'aval (6,40 eq. μg Chla L⁻¹ et 1,7 10⁴ cellules mL⁻¹ au point 6 ter). Les points de prélèvements intermédiaires présentaient des biomasses moyennes d'*Aphanizomenon flos-aquae* et d'*Anabaena flos-aquae* (1,50 ± 0,70 et 1,40 ± 0,70 eq. μg Chla L⁻¹, respectivement). La diatomée, *Fragilaria crotonensis*, présentait toujours les plus fortes biomasses, quel que soit le point considéré (de 3,10 à 12,70 eq. μg Chla L⁻¹).

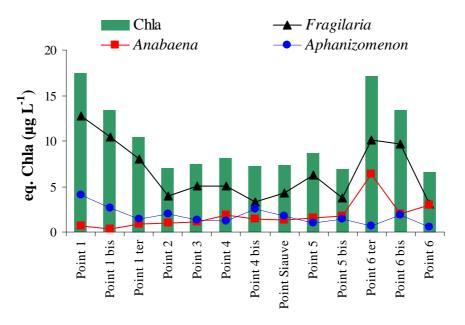


Figure 11: Transect amont (point 1)/ aval (point 6) des concentrations en chlorophylle a total et des biomasses des trois espèces phytoplanctoniques dominantes (eq. μ g Chla L⁻¹) au 23/07/07.

L'évolution temporelle des biomasses des trois principales espèces phytoplanctoniques le long de la retenue est représentée dans la figure 12. L'opposition amont/aval des deux espèces de cyanobactéries mise en évidence fin juillet (Figure 11) ne perdure pas dans le temps. Le développement d'*Anabaena flos-aquae* diminue en quelques jours alors que la biomasse d'*Aphanizomenon flos-aquae* augmente de l'amont vers l'aval en 3 semaines. Ainsi, le pic de l'efflorescence à *Aphanizomenon flos-aquae* apparaît dans un premier temps au point le plus amont (Figure 12 A), le 07/08/07, puis se déplace aux points 2, 3, 4

et 5 (Figure 12 B, C, D et E), le 13/08/07, et enfin au point 6 (Figure 12 F), le 21/08/07. Cette espèce atteint des biomasses relativement importantes (12,10 eq. µg Chla L⁻¹ au point 1 et 12,50 µg eq. Chla L⁻¹ au point 5) correspondant à des densités cellulaires supérieures au seuil d'alerte 1 pour les eaux de baignade (> 2 10⁴ cellules mL⁻¹). Ces recommandations de surveillance et de gestion des phénomènes de prolifération à cyanobactéries dans les eaux de baignade ont été publiées par la Direction générale de la santé (circulaire DGS/SD7A 2003/270, 2004/364, 2005/304).

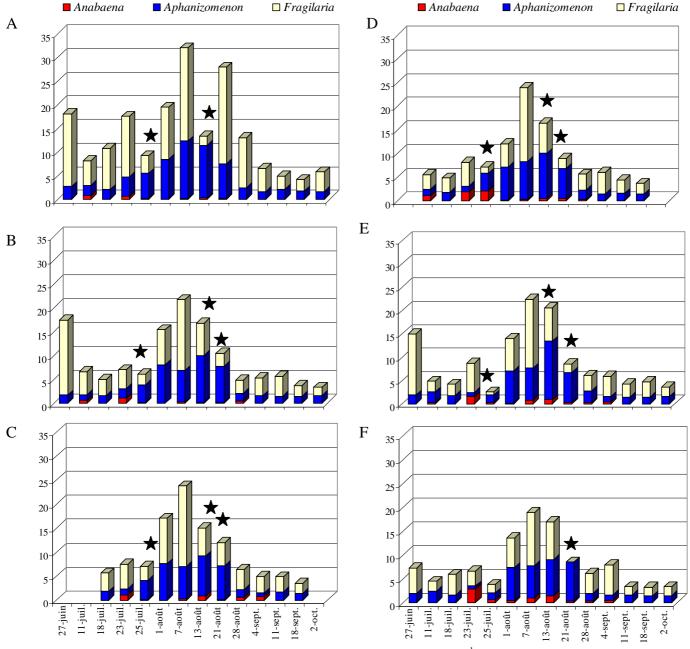


Figure 12 : Histogrammes empilés des biomasses (eq. μg Chla L⁻¹) des trois espèces phytoplanctoniques dominantes aux points 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D), 5 (E) et 6 (F) pendant les campagnes de prélèvements de l'année 2007. ★: date où domine *Aphanizomenon flos-aquae*.

Finalement, si *Fragilaria crotonensis* coexiste avec les deux espèces de cyanobactéries et domine le plus souvent la communauté phytoplanctonique (min. 14% de la biomasse totale; max. 90%; moy. 58% \pm 16%), *Aphanizomenon flos-aquae* est cependant dominante aux 6 points durant la période correspondant à son pic de biomasse (fin juillet à fin août).

Evolution verticale et temporelle des principales espèces phytoplanctoniques

Pour évaluer la distribution verticale des trois espèces phytoplanctoniques dans la colonne d'eau et son évolution dans le temps, des profils verticaux de distribution de biomasse ont été effectués à l'aide d'une sonde spectrofluorimétrique (bbe-Moldaenke). La figure 13, représente les profils réalisés au début (23 juillet), milieu (7 août) et fin (18 septembre) de la mise en place de l'efflorescence à cyanobactéries aux points 1 et 6.

Au point 1, le 23 juillet (Figure 13 A), alors que nous avons observé la mise en place de l'efflorescence à *Aphanizomenon flos-aquae* et la dominance de *Fragilaria crotonensis* (Figure 11), les 2 espèces se répartissent dans toute la couche chaude superficielle (l'épilimnion ≈ 3 m de profondeur), délimitée par la stratification thermique. Il en est de même pour le 7 août (Figure 13 B) alors que la stratification thermique est toujours bien établie et que les biomasses sont beaucoup plus importantes (multipliées par 2). Les profils montrent aussi, à cette même date, que le pic de biomasse d'*Aphanizomenon flos-aquae* (25,50 eq. μg Chla L⁻¹) se situe à 3 m de profondeur alors que celui de *Fragilaria crotonensis* (23 eq. μg Chla L⁻¹) est localisé à 2 m de profondeur, juste au dessus de celui d'*Aphanizomenon flos-aquae*. Lorsque la stratification thermique n'est plus établie (Figure 13 C), les deux espèces présentent elles aussi une répartition moins marquée : la biomasse de la cyanobactérie chute et la diatomée qui domine alors occupe essentiellement les 10 premiers mètres de la colonne d'eau.

Les profils obtenus avec la sonde nous ont aussi fourni d'autres informations intéressantes. C'est ainsi qu'il apparaît qu'au point 6, le 23 juillet (Figure 13 D), la cyanobactérie *Anabaena flos-aquae* s'est développée dans les premiers centimètres de la colonne d'eau. Le 7 août, *Aphanizomenon flos-aquae* a pris le dessus sur *Anabaena flos-aquae* à l'aval de

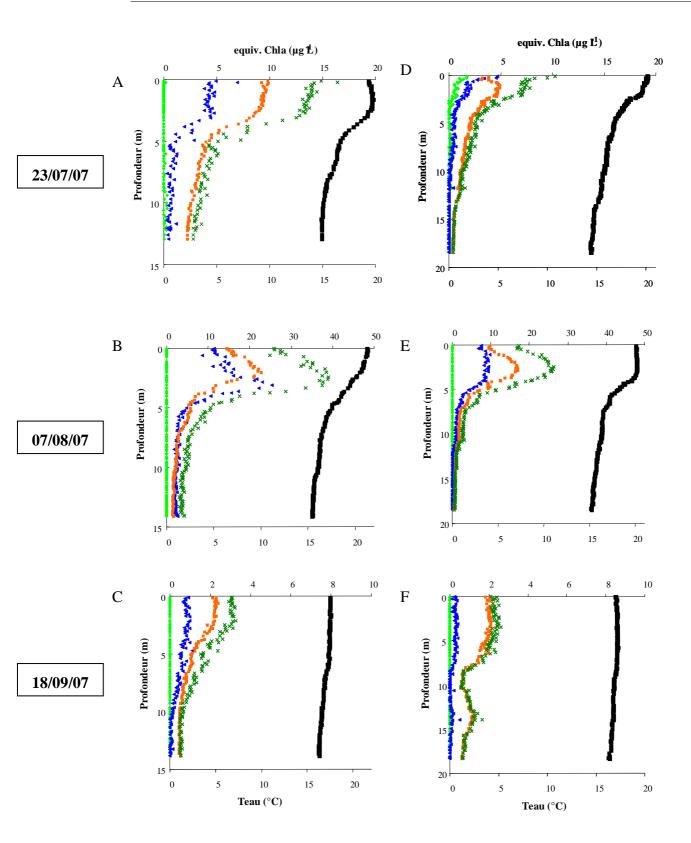


Figure 13 : Profils verticaux de température (**points noirs**) et des biomasses des différents grands groupes phytoplanctoniques (eq. μg Chla L⁻¹): algues vertes (**points verts clairs**), cyanobactéries (**points bleus**), diatomées (**points rouges**) et chlorophylle *a* totale (**points verts foncés**) aux points 1 (A, B et C) et 6 (D, E et F) les 23 juillet, 7 août et 18 septembre.

la retenue (Figure 12 F) où elle s'est retrouvée en compétition avec *Fragilaria crotonensis* sur tout l'épilimnion (Figure 13 E). Les deux cyanobactéries semblent donc avoir des stratégies différentes d'occupation de la colonne d'eau. Enfin, lorsqu'il n'y a plus de stratification thermique (Figure 13 F), *Fragilaria crotonensis* domine la communauté phytoplanctonique mais une faible biomasse d'*Aphanizomenon flos-aquae* persiste. Les deux espèces se développent le long de la colonne d'eau.

3) ANALYSE DES DONNEES

Analyse en composantes principales

Afin de mieux comprendre le déterminisme de la mise en place de l'efflorescence à *Aphanizomenon flos-aquae* à l'amont de la retenue et la présence d'*Anabaena flos-aquae* à l'aval ainsi que l'évolution temporelle et spatiale des principales espèces phytoplanctoniques, une analyse en composantes principales a été réalisée sur l'ensemble des données (79 dates, 11 variables environnementales et 4 variables biologiques ; Figure 14).

Les deux premiers axes de cette ACP expliquent près de 88% de la variabilité totale observée. L'axe 1 est principalement défini par les variables biologiques que sont la biomasse totale en Chla et les biomasses d'Anabaena flos-aquae, Aphanizomenon flosaquae et Fragilaria crotonensis. Ce premier axe montre aussi qu'il existe une relation positive entre le développement de ces espèces et les concentrations en orthophosphates. Sur le second axe de l'analyse, il apparaît une opposition entre les biomasses des cyanobactéries et celle de Fragilaria, la variable Chla ne contribuant que très peu à cet axe de même que les autres variables ne contribuent que très peu. On note cependant qu'il existe une opposition entre les biomasses du phytoplancton et la transparence, ce qui est attendu. Plusieurs autres corrélations existent. Ainsi, l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique et donc de l'activité photosynthétique, en liaison avec l'augmentation de la température de l'eau, est positivement corrélée à l'augmentation du pH ($R^2 = 0.61$; n = 79; $P < 10^{-4}$), à l'augmentation du pourcentage de saturation en oxygène ($R^2 = 0.69$; n =79; $P < 10^{-4}$) et enfin à la diminution de la transparence ($R^2 = 0.54$; n = 79; $P < 10^{-4}$). On peut remarquer aussi une opposition entre les biomasses des 2 espèces de cyanobactéries et les concentrations en NH₄⁺ et NO₃. Sachant que ces deux espèces sont fixatrices d'azote,

il est assez logique qu'elles se développent lorsque l'ammonium et les nitrates sont limitants.

D'une façon globale, cette première analyse montre que les paramètres physico-chimiques étudiés ne nous permettent pas vraiment d'expliquer les variations de biomasse des différentes espèces phytoplanctoniques.

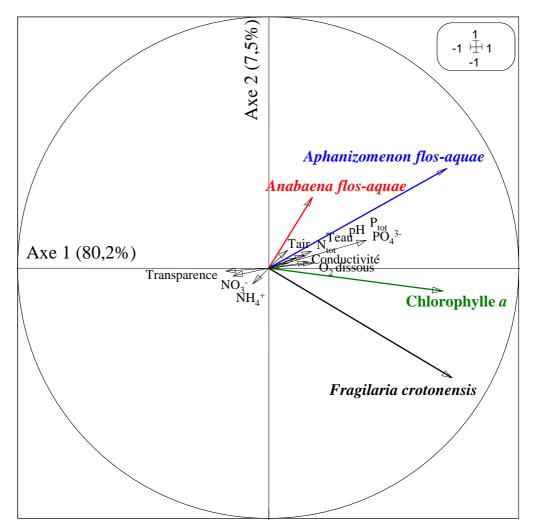


Figure 14 : Analyse en composantes principales réalisée sur les estimations des différentes variables environnementales (Transparence exprimée en cm ; Conductivité exprimée en μS cm⁻¹; Oxygène dissous exprimé en mg O₂ L⁻¹; Température de l'eau et de l'air exprimées en °C ; Phosphore total (P_{tot}), azote total (N_{tot}), phosphate (PO₄³⁻), nitrate (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺) exprimés en mg L⁻1) et biologiques (biomasse totale de Chlorophylle *a* , biomasses d'*Anabaena flos-aquae*, *Aphanizomenon flos-aquae* et de *Fragilaria crotonensis* exprimés en eq. μg Chla L⁻1) obtenues sur les 79 échantillons prélevés entre juin et octobre 2007.

Multidimensional Scaling

L'analyse MDS (Figure 15) réalisée sur les biomasses des trois principales espèces phytoplanctoniques, permet de mettre en évidence une structuration spatiale entre les points d'échantillonnage. Deux types de graphiques peuvent être observés. Les premiers (Figures 15 B, F, G, K, L et M) ne montrent pas de structuration spatiale entre les divers points d'échantillonnage qui se regroupent au centre de la figure. Les seconds montrent en revanche une structuration spatiale qui concerne généralement les points 1 et 6. En effet, le point 1 se distingue des autres points les 18 juillet, 28 août et 2 octobre (Figures 15 C, J et N) et le point 6 de tous les autres points le 27 juin (Figure 15 A). Enfin, les 23 et 25 juillet et les 13 et 21 août (Figures 15 D, E, H et I), les deux points, 1 et 6, se distinguent de tous les autres.

La structuration spatiale et temporelle observée pourrait être en partie liée à des phénomènes météorologiques comme le suggère la confrontation des données représentées sur les figures 12 et 16. La retenue, qui est en régime normal sous l'influence de vents faibles de direction sud-ouest, est à trois reprises (17-19 juillet, 30 juillet-11 août et 25 août-12 septembre ; Figure 16) sous l'influence de vents faibles (< 4,5 m s⁻¹) à forts (de 4,5 à 8 m s⁻¹) de direction nord-est. Il apparaît qu'en dehors de ces périodes de vents du nord-est, une structuration spatiale des biomasses est observée à l'échelle de la retenue (points dispersés dans les graphiques de la Figure 15) et qu'à l'inverse, aucune structuration spatiale n'apparaît lors des périodes ventées (points regroupés au centre des graphiques de la Figure 15). Plus précisément, on observe que :

Le 1^{er} évènement climatique (du 17 au 19 juillet; Figure 16), est caractérisé par des précipitations (79,2 mm en 3 jours) et des températures élevées (max Tair : 23°C; Teau : 19°C). C'est au cours de la période plus calme qui a suivie que se sont installées significativement les cyanobactéries dans la communauté phytoplanctonique: *Aphanizomenon flos-aquae* à l'amont (Figure 12 A, B et C) et *Anabaena flos-aquae* à l'aval (Figure 12 D, E et F). Ce contraste amont/aval de la distribution des cyanobactéries correspond à la structuration spatiale observée sur les figures 15 D et E.

ETUDE SPATIO-TEMPORELLE DE LA DYNAMIQUE DES CYANOBACTERIES DANS LA RETENUE DE BORT LES ORGUES

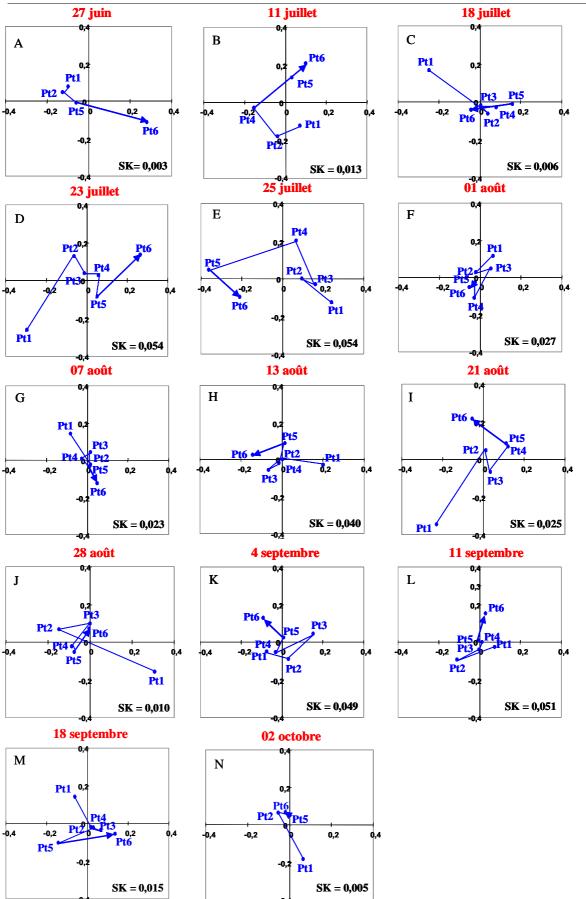


Figure 15 : Multidimensional Scaling sur les données de biomasses (eq. μg Chla L⁻¹) des trois espèces phytoplanctoniques dominantes pour chaque campagne de prélèvement de l'année 2007.

- Le 2^{ème} évènement climatique, plus long (du 30 juillet au 11 août; Figure 16), dominé par des vents du nord-est, coïncide avec la déstructuration spatiale du contraste amont/aval *Aphanizomenon/Anabaena* (Figures 15 F et G) suite à la quasi disparition d'*Anabaena* (Figure 12) et l'augmentation des biomasses d'*Aphanizomenon flos-aquae* en aval (Figures 12 E et F).
- Le 3^{ème} évènement (du 25 août au 12 septembre ; Figure 16) qui se traduit par la déstratification thermique de la colonne d'eau (Figure 13 C et F) est caractérisé par des vents plus forts (jusqu'à 8,9 m s⁻¹), une diminution des températures (max Tair : de 30 à 13 °C ; Teau : de 21°C à 16,5°C) et de fortes précipitations (67,3 mm en 2 jours). On observe en parallèle une déstructuration du contraste spatial amont/aval (*Fragilaria/Aphanizomenon*) (Figures 15 K, L et M) et une diminution de la biomasse phytoplanctonique.

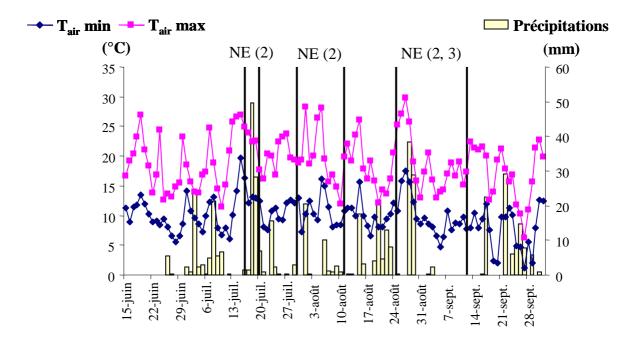


Figure 16: Evolution des variables météorologiques : températures maximales et minimales de l'air (°C), précipitations (mm), à la station Saint-Sulpice (amont de la retenue) du 15 juin au 2 octobre 2007. Les barres verticales indiquent les périodes dominées par des vents du nord-est (NE) et leur force $(2 : < 4,5 \text{ m s}^{-1}; 3 : \text{entre } 4,5 \text{ et } 8 \text{ m s}^{-1})$.

4) Toxicite

Les deux espèces de cyanobactérie présentes lors de la campagne 2007 sont des espèces potentiellement toxiques (Annexes 6 et 7). La quantification des microcystines, des

saxitoxines et/ou la détection de l'anatoxine-a a été réalisée dans les échantillons où les biomasses en cyanobactéries étaient importantes (Tableau 16).

Une faible quantité de MC-LR $(2.75 \pm 0.98~\mu g$ eq. MC-LR $L^{-1})$ a été observée sur un seul des échantillons. Il s'agit de l'échantillon prélevé au bord de la plage des Aubazines (aval de la retenue) suite à l'observation d'une écume verte en surface ayant provoqué la fermeture de la plage. Cependant, cette valeur était inférieure à la valeur seuil préconisée par la DGS pour les eaux de baignade (< 25 μg eq. MC-LR L^{-1}). Les saxitoxines et l'anatoxine-a n'ont pas été mises en évidence. Ainsi, aucun risque toxique lié à la présence des cyanobactéries n'a été observé lors de nos campagnes d'échantillonnage.

Date	Point	Cyanobactérie dominante	Microcystines (eq. μg MC-LR L ⁻¹)	Saxitoxines	Anatoxine-a
19/07/07	Aubazines	Anabaena f. a.	$2,75 \pm 0,98$	_	nd
23/07/07	1	Aphanizomenon f. a.		nd	nd
23/07/07	6 ter	Anabaena f. a.	nd		nd
25/07/07	1	Aphanizomenon f. a.		nd	nd
07/08/07	1	Aphanizomenon f. a.		nd	nd
	2			nd	nd
13/08/07	3	A 1		nd	nd
13/06/07	4	Aphanizomenon f. a.		nd	nd
	5			nd	nd
21/08/07	6	Aphanizomenon f. a.	_	nd	nd

Tableau 16 : Récapitulatif des échantillons analysés pour la quantification des microcystines (eq. μg MC-LR L⁻¹), des saxitoxines et/ou la détection de l'anatoxine-a. nd : non détecté.

5) Conclusion 2007

Comme l'année précédente, le plan d'eau présente un gradient trophique de l'amont vers l'aval. Les paramètres physico-chimiques et biologiques au point 1 sont caractéristiques d'un milieu eutrophe, alors que le reste de la retenue est typique d'un milieu mésotrophe.

En 2007, la biomasse phytoplanctonique était dominée par trois espèces : deux espèces de cyanobactéries filamenteuses, fixatrices d'azote atmosphérique, *Aphanizomenon flos-aquae* et *Anabaena flos-aquae*, et d'une diatomée, *Fragilaria crotonensis*, présente chaque année dans cette retenue (Brigault, 1998; Ruban *et al.*, 1999). Fin juillet, une efflorescence à *Anabaena flos-aquae*, qui a conduit à la fermeture ponctuelle de la plage des Aubazines, a

été mise en évidence à l'aval de la retenue, alors qu'une efflorescence à *Aphanizomenon flos-aquae* s'installait en amont. Si l'efflorescence à *Anabaena flos-aquae* a rapidement disparu, les résultats de nos campagnes d'échantillonnage montrent que celle à *Aphanizomenon flos-aquae* s'est déplacée de l'amont vers l'aval. La diatomée *Fragilaria crotonensis*, quant à elle, est restée dominante la majorité du temps, sur toute la retenue. Finalement même si un développement significatif de cyanobactéries a été observé au cours de l'année 2007, les cyanobactéries n'ont été dominantes que sur une courte durée dans la retenue, quel que soit le point du lac considéré et aucun risque toxique lié à la présence des cyanobactéries n'a été observé lors de nos campagnes d'échantillonnage.

L'analyse descriptive des données physico-chimiques et biologiques (ACP) ne nous a pas permis d'expliquer les variations de biomasse des différentes espèces phytoplanctoniques, ce qui démontre que les variables étudiées ne suffisent pas à comprendre finement les dynamiques relatives des trois espèces dominantes (*Aphanizomenon flos-aquae* et *Anabaena flos-aquae*, et *Fragilaria crotonensis*). En revanche, l'analyse MDS, réalisée sur les biomasses de ces trois espèces, nous a permis de mettre en évidence l'impact important des vents de secteur nord-est sur la structuration spatiale de ces trois espèces. Il est fort probable, au vu de ces résultats, que des périodes relativement longues, de temps calme et ensoleillé, se traduiraient par une structuration spatiale très marquée des distributions d'abondances de ces espèces à l'échelle horizontale. Enfin, les résultats apportés par la sonde spectrofluorimétrique mettent en évidence l'importance de la stratification thermique sur la répartition verticale des espèces phytoplanctoniques présentes en relation avec les stratégies de développement de ces dernières.

Stratégies de développement : Anabaena vs. Aphanizomenon

En milieu eutrophe, la coexistence des deux genres de cyanobactéries fixatrices d'azote atmosphérique, *Anabaena* spp. et *Aphanizomenon* spp., s'observe régulièrement (Reynolds and Bellinger, 1992; Roijackers and Joosten, 1996). Bien que leur activité de fixation de l'azote atmosphérique soit en priorité stimulée par de faibles teneurs en azote minéral, elle est également dépendante de la disponibilité en phosphore, des métaux traces et de la lumière (Howarth *et al.*, 1988). En principe, un de ces facteurs devrait déterminer la

dominance d'*Aphanizomenon* ou d'*Anabaena*. Cette dernière présenterait une activité fixatrice supérieure à celle d'*Aphanizomenon* (Schreurs, 1992; De Nobel *et al.*, 1997) et serait donc plus compétitive qu'*Aphanizomenon* dans les milieux limités en phosphore (Wallström *et al.*, 1992; De Nobel *et al.*, 1997). Néanmoins, la forte capacité d'assimilation du phosphore par *Aphanizomenon* pourrait être un avantage en cas d'apports ponctuels de ce nutriment (De Nobel *et al.*, 1997). D'autre part, *Anabaena*, qui est une cyanobactérie exigeante en lumière (Mur and Schreurs, 1995; De Nobel *et al.*, 1998), développe des voiles à la surface de l'eau (voiles mis en évidence ici par la sonde spectrofluorimétrique - Figure 13 D - et par les observations visuelles lors de la campagne du 23 juillet - Photo 1) dans les milieux calmes, transparents et stratifiés (Reynolds *et al.*, 2002). *Aphanizomenon*, qui peut se développer sous forme de faisceaux de filaments en suspension dans l'eau, est moins exigeante en lumière et pourrait ainsi être avantagée en condition de lumière limitante.



Photo 1 : Efflorescence à *Anabaena flos-aquae* à l'amont de la retenue, photo EPIDOR 23/07/07.

Ainsi, on peut supposer que la mise en place de l'efflorescence à *Aphanizomenon flos-aquae* en amont de la retenue est en partie liée aux apports en phosphore issus de la Dordogne et du Chavanon (57% du flux total de P en 2006; Tableau 1). En revanche, plus en aval, le développement d'*Anabaena flos-aquae* nécessite d'abord qu'il y ait une population préexistante en présence de nutriments assez abondants sur une période de temps assez longue pour permettre la croissance de cette espèce dans la colonne d'eau. En accord avec Reynolds et Walsby (1975), une augmentation du mélange de la colonne d'eau entre le 17 et le 19 juillet (nuits fraîches, vents plus forts, précipitations, diminution de la

lumière moyenne reçue, pulse de nutriments) a pu engendrer une réponse physiologique des cellules d'*Anabaena* (augmentation de la production de vésicules à gaz) conduisant à une augmentation de leur flottabilité. L'établissement ensuite d'une période prolongée de stabilité (faibles vents, fort ensoleillement, hausse des températures nocturnes) a pu favoriser leur accumulation en surface. Cependant cette accumulation a été de très courte durée ici (du 19 au 23 juillet – Photo 1). Les faibles températures de l'eau (15,6°C le 25 juillet au point 6), inférieures à l'optimum de température d'*Anabaena* (28-32°C; Nalewajko and Murphy, 2001) et les précipitations en fin de journée au 23 juillet peuvent avoir contribuées à la disparition de l'accumulation de surface.

<u>Stratégies de développement : Fragilaria vs. Aphanizomenon</u>

Les distributions verticales comparées d'Aphanizomenon flos-aquae et de Fragilaria crotonensis peuvent être liées à leur capacité de flottaison respective. Aphanizomenon flosaquae qui se développe préférentiellement en milieu stratifié (Reynolds et al., 2002) peut, grâce à ses vésicules à gaz, migrer dans la zone euphotique et s'installer dans la couche d'eau la plus propice à son développement. Plus généralement, l'établissement d'une stratification de la colonne d'eau et la limitation des turbulences verticales favorisent les espèces phytoplanctoniques capables de réguler leur flottabilité (Walsby et al., 1997; Huisman et al., 2004). Au contraire, les diatomées comme Fragilaria crotonensis, possèdent une thèque siliceuse qui alourdit les cellules et accélère leur sédimentation. Pour cette raison, les diatomées se développent mieux en milieux non stratifiés (Reynolds et al., 2002), turbulents, qui favorisent leur transport passif et donc leur circulation dans la colonne d'eau et qui leur permettent ainsi de revenir près de la surface où la lumière est plus abondante. Par ailleurs, l'augmentation de la température de l'eau conduisant à une diminution de sa viscosité facilite encore la sédimentation des diatomées en été par rapport à celle des espèces capables de réguler leur flottabilité. Ainsi, plusieurs études (par ex., Dokulil and Teubner, 2000; Eynard et al., 2000; Mischke, 2003; de Figueiredo et al., 2006) portant sur la succession saisonnière du phytoplancton dans les lacs ont montré que les diatomées dominaient sous des conditions de faibles températures et de fortes concentrations en nutriments (généralement au printemps), alors que la dominance des cyanobactéries coïncidait avec des températures plus élevées, de faibles vents et des concentrations en nutriments plus faibles dans l'épilimnion (généralement à la fin de l'été).

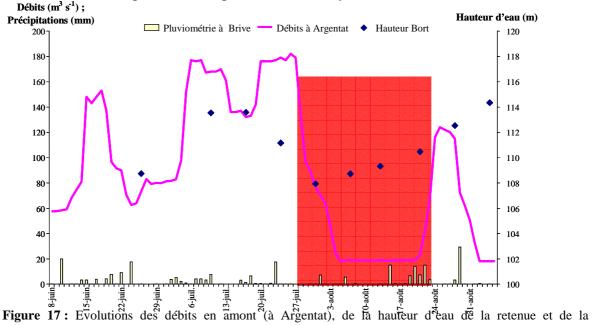
Cependant, l'été 2007 ayant présenté des températures atmosphériques en dessous des normales saisonnières, les températures de l'eau sont elles aussi restées relativement faibles $(T^{\circ}moy = 19^{\circ}C; T^{\circ}min = 15,5^{\circ}C; T^{\circ}max = 23^{\circ}C)$. Elles correspondaient aux optimums de température généralement observés pour les diatomées (17-22°C; Butterwick et al., 2005) et étaient inférieures à ceux d'Aphanizomenon flos-aquae (20-32 °C; Tsujimura et al., 2001; Yamamoto and Nakahara, 2005). La combinaison de ces observations peut expliquer la compétition entre la diatomée Fragilaria crotonensis et la cyanobactérie Aphanizomenon flos-aquae qui a persistée pendant l'été 2007 et le rétablissement d'une dominance nette de la diatomée en tous points du lac dès la fin août suite au 3ème évènement climatique et à la déstratification de la colonne d'eau. De même, ce dernier évènement a pu empêcher le développement de Microcystis aeruginosa. Cette espèce, présente sous forme de paillettes sur toute la retenue à partir de la mi-août, présente souvent un développement tardif (fin août - début septembre), faisant suite aux blooms des cyanobactéries fixatrices d'azote atmosphérique, Anabaena et Aphanizomenon. Il est très probable que les mauvaises conditions climatiques et la déstratification de la colonne d'eau à cette période aient limité le développement de Microcystis aeruginosa.

Distribution spatiale des cyanobactéries : influence des vents

Sur le plan horizontal, l'influence des vents est très importante sur la distribution spatiale des cyanobactéries. En effet, le déplacement de l'efflorescence à *Aphanizomenon flosaquae* de l'amont vers l'aval de la retenue en 3 semaines au mois d'août a coïncidé avec le 2ème évènement climatique caractérisé par des vents de direction nord-est. Ceci suggère un transport de la population cyanobactérienne par les vents. Différents auteurs se sont intéressés à l'impact des courants induits par les vents sur la distribution spatiale du phytoplancton (Verhagen, 1994; Ishikawa *et al.*, 1999; 2002; Kanoshina *et al.*, 2003; Moreno-Ostos *et al.*, 2008). Dans les grands lacs, l'influence du vent sur la distribution horizontale du phytoplancton peut prendre plusieurs jours (10 jours pour un vent de 3 m s⁻¹; Verhagen, 1994). En période de stratification thermique, les vents induiraient une advection horizontale confinée principalement dans l'épilimnion (Imberger and Paterson, 1991) et engendreraient le transport des cyanobactéries ayant de bonnes capacités de flottaison. Dans notre travail, il est apparu aussi que les vents du sud-est semblent avoir peu d'impact sur la distribution spatiale des cyanobactéries (et de la communauté

phytoplanctonique en général) puisque pendant ces périodes, une structuration spatiale dans la distribution des biomasses des trois espèces dominantes a été observée.

Les développements horizontaux et verticaux de ces 3 espèces phytoplanctoniques sont donc étroitement liés aux conditions de stratification de la colonne d'eau et à l'influence des vents du nord-est. Une étude, réalisée sur une rivière australienne (Viney et al., 2007), a consisté à simuler des stratégies de management et de gestion des ouvrages pour minimiser la présence de blooms à Anabaena circinalis qui se développent lorsque la stratification thermique est bien installée, le but étant d'appliquer un courant minimal pour induire une déstratification de la colonne d'eau. Ces travaux ont montré qu'il était possible de prévenir les proliférations de cyanobactéries en gérant ce seul paramètre. Ainsi, il serait intéressant d'étudier et d'optimiser, sur la retenue de Bort Les Orgues, la gestion des débits lors des périodes propices aux développements des cyanobactéries (principalement l'été) afin de limiter la mise en place d'une stratification thermique sur plusieurs jours. Il demeure cependant que toute la difficulté de la mise en place d'une telle gestion des ouvrages en amont et au niveau du barrage de Bort les Orgues réside dans les contraintes liées aux activités de la retenue. En effet, en période estivale, les gestionnaires s'efforcent de maintenir une cote touristique (diminution des débits pour maintenir une hauteur d'eau de la retenue suffisante; Figure 17) qui malheureusement favorise la mise en place de la stratification thermique et donc la prolifération des cyanobactéries.



pluviométrie à Brive. Rectangle rouge : période de proliférations des cyanobactéries (23/07/07 au 21/08/07).

IV.3. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Au cours des 2 années de notre suivi, aucune efflorescence de la cyanobactérie *Microcystis aeruginosa* n'a été mise en évidence dans la retenue de Bort Les Orgues, contrairement aux années précédentes. Nous avons vu que la vidange partielle au cours de l'hiver 2005-2006 et les mauvaises conditions climatiques en 2007 étaient probablement responsables de ces observations. Néanmoins, le caractère eutrophe de cette retenue, la rend propice au développement de cyanobactéries. Compte tenu des enjeux économique et touristique très forts pour le territoire (production d'électricité, baignade, activités nautiques, pêche...), il est nécessaire de surveiller le développement de ces microorganismes et donc de mettre en place un suivi adapté.

A. ORGANISATION DU SUIVI D'UN PLAN D'EAU PRESENTANT UN RISQUE A CYANOBACTERIES ET PARAMETRES PRIS EN CONSIDERATION

La détection rapide des efflorescences à cyanobactéries et des cyanotoxines est un aspect important de tout programme de gestion et de protection des plans d'eau. En effet, une faible abondance en cyanobactéries peut tout de même se traduire par un risque sanitaire important (Bartram *et al.*, 1999). Il est donc nécessaire de mettre en place des suivis adaptés à chaque plan d'eau et de posséder des outils de détection des cyanobactéries et des cyanotoxines qui soient sensibles, robustes et qui fournissent des informations simples à interpréter.

1) DEFINITION DES POINTS D'ECHANTILLONNAGE : VULNERABILITE DES MASSES D'EAU ET HETEROGENEITE SPATIALE

Nous avons soulevé la difficulté de la mise en place, en milieu naturel, de stratégies d'échantillonnage adaptées aux suivis et à l'évaluation des risques liés aux développements de cyanobactéries en relation avec la forte hétérogénéité spatiale et temporelle de leur distribution. Le regroupement d'informations concernant le site (bathymétrie, topographie et hydrodynamiques...) et son historique (développements antérieurs d'efflorescences à cyanobactéries, espèces en cause, période de développement, intensité...) est important pour augmenter les capacités à anticiper les éventuelles proliférations à cyanobactéries.

L'accumulation de ces connaissances sur un plan d'eau permet d'approfondir la compréhension de l'écosystème et facilite l'organisation d'un suivi que l'on pourra alors focaliser sur les périodes et les zones les plus critiques (Codd *et al.*, 1999). Ainsi, il est recommandé, avant de décider des points d'échantillonnages de repérer ces zones critiques :

- arrivées d'affluents (zones généralement plus riches en éléments nutritifs),
- criques, baies prononcées présentant des conditions calmes, ou zones sous les vents dominants qui peuvent favoriser l'accumulation des cellules.

Des points supplémentaires pourront être suivis afin de prendre en compte les différents usages du plan d'eau :

- baignade
- activités nautiques
- captage en profondeur pour la production d'eau potable

En revanche, les procédures de surveillance conventionnelles qui se basent sur l'échantillonnage d'une seule station choisie en fonction de l'information souhaitée ou jugée représentative de l'ensemble du plan d'eau, ne semblent pas adaptées, tout au moins dans des plans d'eaux de surface importante, pour décrire la biomasse, la composition et la dynamique des cyanobactéries.

Par ailleurs, la surveillance est souvent réalisée à partir d'analyses effectuées sur des prélèvements de sub-surface. Dans certains cas, ces analyses sont suffisantes pour avoir une estimation correcte de l'importance du développement des cyanobactéries. Dans d'autres cas, dans la mesure où les cyanobactéries peuvent se déplacer dans la masse d'eau (vésicules à gaz, transports par les vents et les courants qu'ils induisent) et parfois former des couches denses à des profondeurs variables, la prise en compte de la dimension verticale du plan d'eau peut s'avérer importante, voire indispensable (Jacquet *et al.*, 2005).

2) DEFINITION DE LA PERIODE DE SUIVI

La période de suivi doit être adaptée en fonction des connaissances que l'on a du site, des cyanobactéries susceptibles de s'y développer et de leur période de développement préférentiel. Dans la majorité des cas (mais pas toujours) la période la plus propice se situe entre mai et octobre. Des prélèvements bimensuels peuvent être effectués au début et à la

fin de cette période alors qu'il est préférable d'effectuer des prélèvements hebdomadaires de juin à septembre.

Dans tous les cas, il est préférable d'effectuer les prélèvements à la même heure. Ainsi, certaines espèces comme *Microcystis* peuvent s'accumuler en surface des plans d'eau aux premières heures du jour puis se distribuer de façon plus homogène dans les premiers mètres de la colonne d'eau plus tard dans la journée, suite à un « alourdissement » des cellules résultant de la synthèse de réserves carbonées due à leur activité photosynthétique. C'est pourquoi certaines efflorescences sont visibles à l'œil nu en début de matinée et ne le sont plus ensuite (Oliver and Gant, 2000).

3) VEILLE PREALABLE A UNE EVENTUELLE EFFLORESCENCE

Une veille visuelle peut être organisée avant la période propice au développement des cyanobactéries. Elle permettra une détection précoce de la mise en place d'une efflorescence. Au cours de cette action, on pourra noter : la coloration de l'eau, l'aspect de la surface du plan d'eau, l'odeur. Ces observations peuvent être faites par une personne préalablement formée s'appuyant sur des guides d'identification visuelle des efflorescences (Leitao et Couté, 2005 ; Blais, 2006 ; Figure 18).

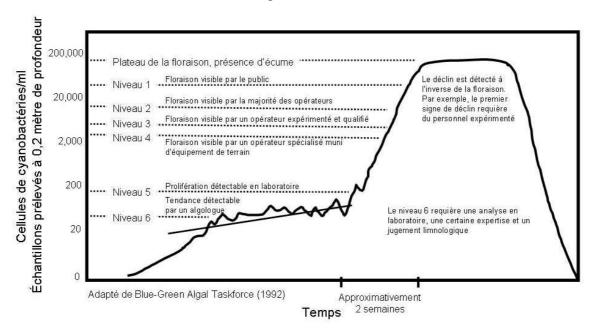


Figure 18 : Courbe de croissance de cyanobactéries et niveaux de détection en fonction de l'expérience de l'observateur.

En parallèle à cette veille visuelle, on pourra tenir compte des conditions météorologiques (ensoleillement, température de l'air, présence de vents, leur direction et leur intensité, pluviométrie) sachant que les périodes les plus calmes et chaudes sont souvent les plus propices à la mise en place des efflorescences.

4) ESTIMATION DE LA BIOMASSE PHYTOPLANCTONIQUE PRESENTE

Méthodes conventionnelles

La mesure de la chlorophylle a, principal pigment responsable de l'absorption de la lumière chez les organismes photosynthétiques, est internationalement utilisée comme un proxi de l'estimation de la biomasse phytoplanctonique totale (incluant les cyanobactéries). Cette mesure n'est donc pas spécifique des cyanobactéries. Ainsi, il convient, lors d'un suivi visant à étudier le développement de ces organismes sur un site, de mettre en œuvre des moyens qui leurs soient spécifiques pour compléter l'information fournie par la mesure de la chlorophylle a.

Avant la mise en place d'une efflorescence, un suivi régulier des zones à risques par une analyse qualitative des échantillons peut être appliquée. L'identification des différents taxons phytoplanctoniques, dont les cyanobactéries, peut être réalisée par une observation au microscope photonique et permettre d'évaluer l'évolution de leurs proportions respectives (taxons dominants ou minoritaires).

Une fois la présence de cyanobactéries avérée, l'évaluation de leur densité cellulaire (nombre de cellules par litre d'eau du lac), est nécessaire. Dans le cas d'efflorescences plurispécifiques, il pourra être important de traduire ces densités cellulaires en termes de biomasses (mg de cyanobactéries par litre d'eau) pour évaluer la part respective de biomasse liée à chaque espèce de cyanobactérie.

Les méthodes de dénombrement les plus classiquement utilisées sont :

- la technique Utermöhl (1958) consistant à réaliser un comptage au microscope photonique inversé d'échantillons préalablement concentrés par sédimentation,
- le comptage d'échantillons d'eau brute (quand les biomasses de cyananobactéries sont suffisamment importantes pour ne pas nécessiter de concentration préalable de

l'échantillon) sous un microscope photonique droit, sur des cellules de numération cellulaires (type cellule de Malassez, cellule de Nageotte...).

La mise en œuvre de ces expertises nécessite un personnel qualifié préalablement formé par des experts. Ces méthodes étant longues et fastidieuses il faut adapter le niveau de précision de l'évaluation en fonction de la, ou des, cyanobactéries impliquée(s) dans la prolifération et du niveau de précision nécessaire (identification et dénombrement par genres ou par espèces, dénombrement de toutes les cyanobactéries, des espèces (genres) dominantes ou de l'espèce (genre) dominante.

Méthodes en développement

Depuis quelques années, des sondes submersibles fluorescentes ont été configurées pour étudier les distributions spatiales des différentes communautés phytoplanctoniques. Elles permettent de mesurer les concentrations de certains pigments photosynthétiques du phytoplancton dans l'eau et traduisent ces concentrations en terme de biomasse. Ces sondes ont aussi une application plus directe dans la surveillance du développement phytoplanctonique dans les lacs, plans d'eau et retenues et de façon plus générale pour toutes les applications de suivi de la qualité des eaux du milieu naturel.

Deux types de sondes submersibles basées sur ce principe sont actuellement commercialisés: la sonde spécifique des principaux groupes phytoplanctoniques et la sonde spécifique des cyanobactéries. A notre connaissance, seule la sonde Fluoroprobe (bbe-Moldaenke) permettant l'estimation simultanée des biomasses des différents grands groupes phytoplanctoniques est présente sur le marché. Alors que plusieurs modèles de détecteurs spécifiques à la signature spectrale des cyanobactéries sont disponibles. En plus de la fluorescence par la phycocyanine et la Chla, ces instruments peuvent mesurer une multitude de variables physico-chimiques pouvant être utiles à la compréhension du développement des cyanobactéries. Les fluorescences peuvent être mesurée par 1) des fluorimètres mesurant chaque échantillon individuellement (Aquafluor de Tuner Designs); 2) des fluorimètres en circulation continue (WETStar de WetLabs, Cyano Watch et Phycocyanin Optical Kit de Turner Designs); 3) des sondes submersibles (microFlu-blue

de TriOS) et 4) la télédetection. Pour cette étude, nous ne présentons et discutons que les sondes submersibles que nous avons pu tester et utiliser.

> La sonde spécifique des principaux groupes phytoplanctoniques (ex: Fluoroprobe, bbe-Moldaenke)

Comme nous l'avons vu dans notre étude, cet outil permet, grâce aux propriétés pigmentaires des différents organismes phytoplanctoniques, de suivre *in situ* la distribution spatiale (horizontale et verticale) des cyanobactéries et d'évaluer l'importance relative de leur biomasse par rapport à celle de la communauté totale du phytoplancton et notamment des trois principaux groupes phytoplanctoniques (diatomées, chlorophycées et cryptophycées).

Cette sonde a pour avantages :

- de donner une estimation en temps réel de la biomasse phytoplanctonique,
- de permettre un suivi au cours du temps plus aisé que celui accessible par les méthodes conventionnelles,
- de déceler de faibles biomasses (limites inférieures : 0,5 1 eq. μg Chla L⁻¹), ce qui rend possible une intervention rapide et efficace pour la fermeture d'une zone de baignade, l'enlèvement des cellules et de leurs toxines avant leur entrée dans le processus de traitement des eaux par exemple (Gregor *et al.*, 2007) ou encore une meilleure gestion de la profondeur d'une prise d'eau.

En effet, son utilisation ne nécessite pas de manipulation élaborée (mais une formation de base est essentielle ainsi qu'une calibration régulière) et l'obtention de l'estimation de la quantité et de la distribution dans la colonne d'eau des cyanobactéries est très rapide (quelques minutes). L'obtention et la possibilité de visualisation "en direct" des résultats rend cette approche très pertinente pour l'étude et le suivi des cyanobactéries qui ont des capacités migratoires le long de la colonne d'eau et qui subissent aussi sous l'action des forces physiques (vents, courants...) des déplacements horizontaux. Cette méthode est donc appropriée pour le suivi en plusieurs points lorsque la distribution des cyanobactéries est très hétérogène.

Cependant, cette sonde présente également des limites :

- possibilité de réabsorption du signal lumineux lors de la présence de substances humiques ou de bloom phytoplanctonique dense (la taille des colonies et la formation des flocs peuvent perturber le signal),
- problème de photoquenching (en surface les cellules photosynthétiques sont saturées de lumière et ne répondent pas au signal), ce qui sous estime les valeurs, il est donc préférable d'effectuer les profils tôt le matin,
- l'état physiologique des cellules peut entraîner des variations du contenu pigmentaire sans pour autant qu'il y ait évolution de la biomasse.

Cet appareil est utilisé abondamment dans le cadre d'études sur les cyanobactéries et sur la structure des communautés phytoplanctoniques (Beutler *et al.*, 2002 ; Leboulanger *et al.*, 2002 ; Gregor and Marsalek, 2004 ; 2005 ; See *et al.*, 2005 ; Gregor *et al.*, 2007 ; Moreno-Ostos *et al.*, 2008). Il peut être couplé à des capteurs enregistrant en continu des paramètres physico-chimiques. Un programme de recherche (PROLIPHYC) mettant en œuvre cet assemblage est actuellement en cours dans le cadre de l'ANR PRECODD. Le but de cette étude est de développer, jusqu'à la préindustrialisation, un système opérationnel pour la surveillance et l'alerte en temps réel des proliférations phytoplanctoniques et notamment des cyanobactéries. Ce système est basé sur l'utilisation de bouées équipées de capteurs (dont une sonde spectrofluorimétrique pour la mesure de la chlorophylle *a* et l'estimation des proportions de cyanobactéries) qui télétransmettent des données. Ces données alimentent alors un module d'alerte pour les gestionnaires ainsi qu'un modèle prédictif de la croissance des cyanobactéries. Ce travail devrait permettre à terme de déterminer en quel lieu il sera le plus intéressant de placer la bouée de surveillance pour suivre la dynamique temporelle des populations de cyanobactéries.

➤ La sonde spécifique des cyanobactéries (ex : microFlu-blue, TriOS)

Récemment une nouvelle sonde capable d'estimer *in situ* et instantanément l'abondance des cyanobactéries a été commercialisée. Ce fluorimètre permet la mesure de la fluorescence émise par la phycocyanine (pigment spécifique des cyanobactéries). Elle est dotée d'une diode émettant à 620 nm et de photo diodes détectrices à 655 nm. Les mesures obtenues sont exprimées en µg L⁻¹ de phycocyanine.

À l'heure actuelle, cette méthode est en cours de validation et une seule étude a été jusqu'alors publiée (Brient et al., 2008). Cependant, dans le cadre d'un partenariat avec la DRASS Rhône-Alpes, ayant acquis les deux types de sondes, nous avons pu réaliser quelques expérimentations afin de comparer leur efficacité de détection et d'estimation de l'abondance des cyanobactéries. Bien que la sonde microFlu-blue présentait des réponses linéaires et constantes (sauf avec *Microcystis*) à l'ajout de culture pure de cyanobactéries, nous nous interrogeons sur la façon dont est calculée la concentration en phycocyanine et donc sur la fiabilité de cette méthode. En effet, la sonde émet un faisceau lumineux qui se propage dans l'eau, la mesure n'est alors pas prise dans un volume défini. Nous avons également mis en évidence que le signal pouvait être atténué par la présence d'autres microorganismes phytoplanctoniques (une chlorophycée, Chlorella vulgaris) ou de particules non phytoplanctoniques (terre) augmentant alors la turbidité du milieu, conditions plus représentatives de ce que l'on trouve in situ. De même, la mesure ne sera pas la même selon la distance de la sonde par rapport au fond, selon la couleur du fond et si la mesure est prise à l'obscurité ou en présence de lumière. Enfin les données fournies par cette sonde ont une unité de mesure non définie (ce sont des quantités de phycocyanine) ce qui rend difficile la comparaison avec les données de la sonde bbe qui sont exprimées en eq. µg Chla L⁻¹ ou l'estimation de la biomasse totale par extraction et dosage de la Chla.

Ces méthodes, bien que prometteuses, sont en cours de validation. De plus, elles ne permettent pas l'identification du phytoplancton à l'espèce et ne distinguent pas les espèces potentiellement toxiques des non toxiques. Elles ne peuvent donc pas remplacer à ce jour les méthodes conventionnelles et nécessitent d'être utilisées en parallèle avec des identifications et comptages au microscope.

5) DETECTION DES CYANOTOXINES

Dans le cas de la mise en évidence d'une dominance à cyanobactéries potentiellement toxiques, la détection, l'identification et la quantification des cyanotoxines peuvent être réalisées. Deux types de méthodes, complémentaires dans leur utilisation mais très différentes dans leur mise en œuvre et dans l'information fournie, peuvent être utilisées.

Méthodes chromatographiques

Ces méthodes permettent l'identification et la quantification des diverses toxines présentes dans l'échantillon. Elles font appel à des techniques analytiques parfois sophistiquées et coûteuses (chromatographie liquide haute performance ultra-violet; CLHP-UV et spectrométrie de masse; CLHP-SM). La méthode CLHP-UV, contrairement à la méthode CLHP-SM, ne permet de détecter et de quantifier que les variants pour lesquels les étalons sont disponibles. Les résultats de ces deux méthodes sont exprimés soit en µg de chaque variant par litre, soit en µg L⁻¹ d'équivalent MC-LR (correspondant à la somme des différents variants), soit en µg L⁻¹ de MC-LR mesurant uniquement la quantité de MC-LR.

Méthodes bioanalytiques

Ces méthodes, tels que les tests immunologiques de type ELISA, des tests sur lignées cellulaires (test sur neuroblastomes pour la détection des saxitoxines) et diverses méthodes de dosages enzymatiques (test PP2a pour la détection des microcystines et nodularines), sont simples et peu coûteuses. Elles permettent d'estimer rapidement le risque toxique associé à un bloom en produisant une réponse moléculaire globale, mais ne permettent pas de distinguer les quantités des différents variants de microcystines. Les résultats sont exprimés en µg d'équivalent MC-LR étalon par litre. Cependant, cette réponse peut être entachée d'un biais résultant de l'affinité variable des différents variants de MC avec les enzymes ou les anticorps utilisés.

A ce jour, les microcystines sont les seules cyanotoxines dont le dosage fait l'objet d'une réglementation en France (circulaires DGS/SD7A 2003/270³⁴, 2004/364³⁵, 2005/304³⁶).

6) PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

A ce suivi biologique, il est conseillé d'ajouter celui de paramètres physico-chimiques qui influencent (température de l'eau) ou peuvent traduire (transparence, oxygène, pH) le développement d'une efflorescence. En complément, les concentrations en éléments nutritifs majeurs (azote et phosphore total et dissous) peuvent également être évaluées. Elles apporteront des informations sur l'évolution du niveau trophique du plan d'eau et donc sur la capacité du milieu à soutenir le développement de la biomasse phytoplanctonique en général et cyanobactérienne en particulier.

Finalement, la récolte et l'étude de l'ensemble de ces informations et de leur évolution d'une année sur l'autre, en parallèle avec celles des données du suivi des cyanobactéries, permettra d'acquérir une meilleure connaissance du fonctionnement global d'un écosystème et son évolution à différentes échelles temporelles qui peut s'avérer précieuse pour mieux anticiper les blooms voire pour envisager des mesures de remédiation. Il est donc très important de procéder à des suivis réguliers si l'on veut vraiment comprendre le fonctionnement d'un écosystème.

B. Proposition de suivi sur la retenue de Bort Les Orgues

En France, depuis 2003 des recommandations de surveillance et de gestion des proliférations de cyanobactéries dans des eaux de baignade ont été publiées par la DGS (circulaires DGS/SD7A 2003/270³⁴, 2004/364³⁵, 2005/30436) sur la base d'un avis du CSHPF (avis du 6 mai 2003). Cependant, aucune stratégie et méthodes de prélèvements n'ont été préconisées pour l'échantillonnage et il en est de même pour les méthodes d'estimation des abondances cellulaires et des concentrations en toxines. Le manque de moyens supplémentaires accordés pour cette surveillance et l'absence d'harmonisation des méthodes analytiques entre les différents organismes chargés du suivi provoquent beaucoup d'interrogations auprès des organismes et des personnes en charge de la surveillance des cyanobactéries. De plus, cette disparité dans les suivis rend difficile les comparaisons entre sites alors que celles-ci pourraient contribuer à mieux comprendre le déterminisme des proliférations de cyanobactéries.

Suite à notre travail, il nous est désormais possible de préconiser pour la retenue de Bort Les Orgues différents types de suivis qui sont détaillés ci-dessous.

1) SUIVI CLASSIQUE ET CIBLE DE LA PROLIFERATION DES CYANOBACTERIES

Ce suivi correspond à un scénario classique de stratégie de surveillance inspiré de l'arbre décisionnel appliqué en France (d'après l'avis du CSHPF du 6 mai 2003; Figure 19). Sans prendre en compte la contrainte financière des budgets alloués à la surveillance (qui conditionnera le nombre de prélèvements et le pas de temps d'échantillonnage), et en nous appuyant sur les conclusions de notre étude, il nous paraît important qu'au moins 3 points de la retenue fassent l'objet d'un suivi:

- le point 1 car il est situé à proximité des principaux affluents (la Dordogne et le Chavanon) responsables de l'eutrophisation de la retenue et qu'il est suspecté d'être le point de départ d'efflorescences à cyanobactéries.
- **le point Aubazine** (entre les points 6 et 5) car ce point présente des caractéristiques hydro-morphologiques favorables aux développements de cyanobactéries, qu'il est également situé à proximité d'un des affluents responsable de l'eutrophisation de la retenue (la Rhue) et qu'il est proche d'une zone de baignade.
- **le point Siauve** car ce point est situé dans une zone de baignade et qu'il semble représentatif de plusieurs autres points de la retenue (points 2, 3 et 4) comme l'ont montré nos analyses.

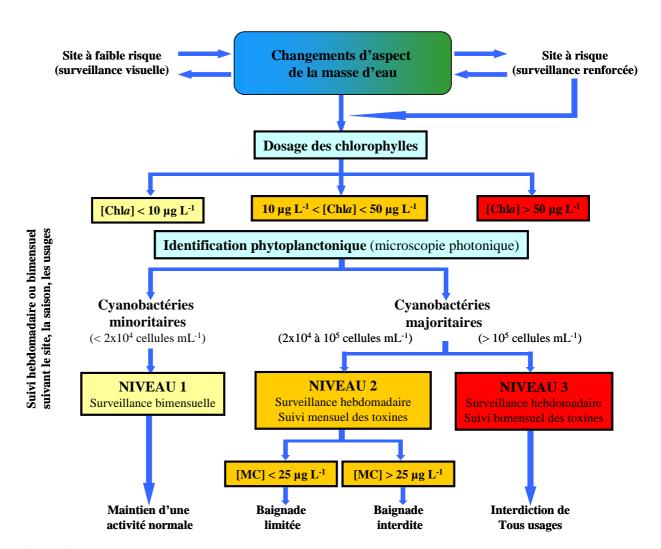


Figure 19 : Schéma décisionnel pour l'évaluation des risques associés aux cyanobactéries et à leurs toxines.

Les campagnes de prélèvements peuvent être réalisées de la façon suivante :

- des campagnes bimensuelles (en mai, juin et octobre) avant et après la période à risque,
- des campagnes hebdomadaires (de juillet à septembre) pendant la période propice aux développements de cyanobactéries.

→ Soit un total de 20 campagnes

Lors de chaque campagne seront réalisés sur les prélèvements d'eau prélevés en subsurface:

- le dosage de la chlorophylle *a* (prélèvement en bouteille),
- l'identification (prélèvement au filet à plancton) et le comptage (prélèvement en bouteille) des organismes phytoplanctoniques.

→ Soit un total de 180 à 250 € HT par point échantilonné

Le choix de prélever en sub-surface repose sur une contrainte de coût car il est bien évident que la distribution hétérogène dans la colonne d'eau des cyanobactéries pourrait nécessiter de réaliser des prélèvements à diverses profondeurs. Cependant, c'est en surface que la probabilité de trouver des cyanobactéries est la plus importante.

Le coût total de la surveillance pourrait donc représenter une somme minimale de 10 800 à 15 000 € HT pour les 3 points échantillonnés à laquelle devra s'ajouter des frais d'analyse pour les toxines (de 23 à 300 € HT par analyse selœn la technique utilisée et le degré de précision souhaité) si la dominance de cyanobactéries potentiellement toxiques est avérée. Enfin, si le budget le permet, il serait préférable que ces prélèvements soient réalisés en triplicats afin d'avoir plus de certitudes dans les estimations réalisées mais ce n'est pas indispensable si plusieurs points sont surveillés et si cette surveillance s'effectue à une fréquence temporelle raisonnable (bi-mensuelle ou hebdomadaire).

Rq: Ce suivi ne prend pas en compte le coût des mesures in situ (températures de l'eau et de l'air, pH, transparence, concentration et/ou pourcentage de saturation en oxygène), ni celui de la main d'œuvre et d'envoie, prise en charge des échantillons.

2) SUIVI EXPERIMENTAL ET PROSPECTIF DE LA PROLIFERATION DES CYANOBACTERIES

Un deuxième type de suivi peut être proposé en plus du suivi classique. Ce suivi comprend :

- des analyses des profils verticaux par une sonde submersible fluorescente.

En effet, notre étude a montré que la distribution verticale des différentes espèces pouvait être variable (accumulation en surface pour l'une, distribution plus en profondeur pour l'autre), ce qui nécessiterait dans l'absolu, d'effectuer des prélèvements à diverses profondeurs (cf. paragraphe précédent). L'utilisation d'une sonde submersible fluorescente permet d'acquérir rapidement des profils verticaux de la biomasse relative des cyanobactéries aux 3 points de prélèvements définis mais également à différents points de la retenue si les gestionnaires veulent appliquer une surveillance plus précise. L'acquisition d'une telle sonde peut paraître exorbitante (de ≈ 7 000 € pour une sonde microFlu-blue, TriOS à ≈ 25 000 € pour une sonde Fluoroprobe, bbe-Moldaenke) mais cet outil peut permettre de limiter le nombre de prélèvements et d'analyses conventionnelles dont les coûts sont élevés. De plus, cet outil peut être financé au niveau d'une région et pourrait être ainsi utilisé par différentes DDASS, comme cela se pratique déjà en Région Rhône-Alpes. L'investissement dans un tel outil peut donc être rapidement rentabilisé lorsqu'il est bien intégré dans une stratégie de surveillance des risques sanitaires liés aux proliférations de cyanobactéries.

L'intérêt est donc d'utiliser la sonde comme un outil d'aide à la décision pour déclencher ou augmenter les fréquences d'échantillonnages et adapter la localisation des campagnes de prélèvements.

3) Suivi des concentrations en elements nutritifs

Le suivi des concentrations en éléments nutritifs majeurs (Ntot, Ptot, NH₄⁺, NO₃⁻ et PO₄³⁻) apporterait, en complément, des informations sur les capacités du milieu à soutenir le développement de la biomasse phytoplanctonique en général et des cyanobactéries en particulier. Ils permettraient aussi d'alimenter, comme les suivis biologiques, une base de données qui, à terme, pourrait être très utile pour estimer l'évolution de l'état écologique de la retenue de Bort Les Orgues.

V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bartram, J., Burch, M., Falconer, I.R., Jones, G., and Kuiper-Goodman, T. (1999) Situation assessment, planing and management. In *Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. Chorus, I., and Bartram, J. (eds). London: E. & F.N. Spon, pp. 179-210.

Beutler, M., Wiltshire, K.H., Meyer, B., Moldaenke, C., Lüring, C., Meyerhöfer, M., Hanse, U.P., and Dau, H. (2002) A fluorometric method for the differentiation of algal populations *in vivo* and *in situ*. *Photosynthesis Research* **72**: 39-53.

Blais, S. (2006) Guide d'identification des fleurs d'eau de cyanobactéries. Comment les distinguer des végétaux observés dans nos lacs et nos rivières. Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, pp. 52.

Briand, J.F., Robillot, C., Quiblier-Lloberas, C., and Bernard, C. (2002) A perennial bloom of *Planktothrix agardhii* (Cyanobacteria) in a shallow eutrophic French lake: limnological and microcystin production studies. *Archives für Hydrobiology* **153**: 605-622.

Brient, L., Lengronne, M., Bertrand, E., Rolland, D., Sipel, A., Steinmann, D., Baudin, I., Legeas, M., Le Rouzic, B., and Bormans, M. (2008) A phycocyanin probe as a tool for monitoring cyanobacteria in freshwater bodies. *Journal of Environmental Monitoring* **10**: 248-255.

Brigault, S. (1998) Approche biogéochimique et isotopique sur les eaux de la retenue de Bort Les Orgues (Massif Central – France). Thèse de doctorat européen, pp. 182.

Butterwick, C., Heaney, S.I., and Talling, J.F. (2005) Diversity in the influence of temperature on the growth rates of freshwater algae, and its ecological relevance. *Freshwater Biology* **50**: 291-300.

Carmichael, W.W., Biggs, D.F., and Peterson, M.A. (1979) Pharmacology of anatoxin-a produced by freshwater cyanophyte *Anabaena flos-aquae* NCR-44-1. *Toxicon* **17**: 229-236.

Codd, G.A., Chorus, I., and Burch, M. (1999) Design of monitoring programmes. In *Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. Chorus, I., and Bartram, J. (eds). London: E. & F.N. Spon, pp. 313-328.

Delvin, J.P., Edwards, O.E., Gorham, P.R., Hunter, M.R., Pike, R.K., and Stavric, B. (1977) Anatoxin-a, a toxic alkaloid from *Anabaena flos-aquae* NCR-44-1. *Canadian Journal of Chemistry* **55**: 1367-1371.

De Figueiredo, D.R., Reboleira, A.S.S.P., Antunes, S.C., Abrantes, N., Azeiteiro, U., Goncalves, F., and Pereira, M.J. (2006) The effect of environmental parameters and cyanobacterial blooms on phytoplankton dynamics of a Portuguese temperate lake. *Hydrobiologia* **568**: 145-157.

De Nobel, W.T., Huisman, J., Snoep, J.L., and Mur, L.R. (1997) Competition for phosphorus between the nitrogen-fixing cyanobacteria *Anabaena* and *Aphanizomenon*. *FEMS Microbiology Ecology* **24**: 259-267.

De Nobel, W.T., Matthijs, H.C.P., Von Elert, E., and Mur, L. (1998) Comparison of the light-limited growth of the nitrogen-fixing cyanobacteria *Anabaena* and *Aphanizomenon*. *New Phytologist* **138**: 579-587.

Dokulil, M.T., and Teubner, K. (2000). Cyanobacterial dominance in lakes. *Hydrobiologia* **438**: 1-12.

EPIDOR (2004) Contrat de Rivière Haute Dordogne, Rapport suivi qualité 2004, pp. 29.

EPIDOR (2005) Contrat de Rivière Haute Dordogne, Rapport suivi qualité 2005, pp. 21.

EPIDOR (2006) Contrat de Rivière Haute Dordogne, Rapport suivi qualité 2006, pp. 23.

Eynard, F., Konstanze, M., and Walther, J.L. (2000) Risk of cyanobacterial toxins in Riga Waters (Latvia). *Water Research* **34**: 2979-2988.

Gugger, M., Lyra, C., Henriksen, P., Couté, A., Humbert, J.F., and Sivonen, K. (2002) Phylogenetic comparison of the cyanobacterial genera *Anabaena* and *Aphanizomenon*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **52**: 1867-1880.

Gugger, M., Lenoir, S., Berger, C., Ledreux, A., Druart, J.C., Humbert, J.F., Guette, C., and Bernard, C. (2005) First report in a river in France of the benthic cyanobacterium Phormidium favosum producing anatoxin-a associated with dog neurotoxicosis. *Toxicon* **45**: 919-928.

Gregor, J., and Marsalek, B. (2004) Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll *a*: a comparative study of *in vitro*, *in vivo* and *in situ* methods. *Water Research* **38**: 517-522.

Gregor, J., and Marsalek, B. (2005) A simple *in vivo* fluorescence method for the selective detection and quantification of freshwater cyanobacteria and eukaryotic algae. *Acta Hydrochimica and Hydrobiologica* **33**: 142-148.

Gregor, J., Marsalek, B., and Sipkova, H. (2007) Detection and estimation of potentially toxic cyanobacteria in raw water at the drinking water treatment plant by *in vivo* fluorescence method. *Water Research* **41**: 228-234.

Howarth, R.W., Marino, R., and Cole, J.J. (1988) Nitrogen fixation in freshwater, estuarine and marine ecosystems. 2. Biogeochemical controls. *Limnology and Oceanography* **33**: 688-701.

Huisman, J., Sharples, J., Stroom, J., Visser, P.M., Kardinaal, W.E.A., Verspagen, J.M.H., and Sommeijer, B. (2004) Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. *Ecology* **85**: 2960–2970.

Humpage, A.R., Ledreux, A., Fanok, S., Bernard, C., Briand, J.F., Eaglesham, G., Papageorgiou, J., Nicholson, B., and Steffensen, D. (2007) Application of the neuroblastoma assay for paralytic shellfish poisons to neurotoxic freshwater cyanobacteria: interlaboratory calibration and comparison with other methods of analysis. *Environmental Toxicology and Chemistry* **26**: 1512-1519.

Imberger, J., and Patterson, J.C. (1991) Physical Limnology. *Advances in Applied Mechanics* **27**: 303-475.

Ishikawa, K., Kumagai, M., Nakano, S., and Nakahara, H. (1999) The influence of wind on the horizontal distribution of bloom-forming cyanobacteria in Akanoi Bay, Lake Biwa. *Japanese Journal of Limnology* **60**: 531-538.

Ishikawa, K., Kumagai, M., Vincent, W.F., Tsujimura, S., and Nakahara, H. (2002) Transport and accumulation of bloom-forming cyanobacteria in a large, mid-latitude lake: the gyre-*Microcystis* hypothesis. *Limnology* **3**: 87-96.

Jacquet, S., Briand, J.F., Leboulanger, C., Avois-Jacquet, C., Oberhaus, L., Tassin, B., Vinçon-Leite, B., Paolini, G., Druart, J.C., Anneville, O., and Humbert, J.F. (2005) The proliferation of the toxic cyanobacterium *Planktothrix rubescens* following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget). *Harmful Algae* **4**: 651-672.

Komarek, J., and K. Anagnostidis. (2005) Cyanoprokaryota. 2. Teil Oscillatoriales. In Süβwasserflora von Milleleuropa. München: Elservier Gmbh, pp.759.

Kanoshina, I., Lips, U., and Leppänen, J.M. (2003) The influence of weather conditions (temperature and wind) on cyanobacterial bloom development in the Gulf of Finland (Baltic Sea). *Harmful Algae* **2**: 29-41.

Krienitz, L., Ballot, A., Wiegand, C., Kotut, K., Codd, G.A., and Pflugmacher, S. (2002) Cyanotoxin-producing bloom of *Anabaena flos-aquae*, *Anabaena discoidea* and *Microcystis aeruginosa* (cyanobacteria) in Nyanza Gulf of Lake Victoria, Kenya. *Journal of Applied Botany-Angewandte Botanik* **76**: 179-183.

Leitao, M., et Couté, A. (2005) Guide pratique des cyanobactéries du Grand Ouest de la France. Agence de l'Eau Seine Normandie, Nanterre, pp. 63.

Leboulanger, C., Dorigo, U., Jacquet, S., Le Berre, B., Paolini, G., and Humbert, J.F. (2002) Application of a submersible spectrofluorometer for raid monitoring of freshwater cyanobacterial blooms: a case study. *Aquatic Microbial Ecology* **30**: 83-89.

Lund, J.W.G. (1951) A sedimentation technique for counting algae and other organisms. *Hydrobiologia* **3**: 390-394.

Lyra, C., Hantula, J., Vainio, E., Rapala, J., Rouhiainen, L., and Sivonen, K. (1997) Characterization of cyanobacteria by SDS-PAGE of whole-cell proteins and PCR/RFLP of the 16S rRNA gene. *Archives of Microbiology* **168**: 176-184.

Lyra, C., Suomalainen, S., Gugger, M., Vezie, C., Sundman, P., Paulin, L., and Sivonen, K. (2001) Molecular characterization of planktonic cyanobacteria of *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* and *Planktothrix* genera. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **51**: 513-526.

Mahmood, N.A., and Carmichael, W.W. (1986) Paralytic shellfish poisons produced by the freshwater cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* NH-5. *Toxicon* **24**: 175-186.

Mahmood, N.A., and Carmichael, W.W. (1987) Anatoxin-a(s), an anticholinesterase from the cyanobacterium *Anabaena flos-aquae* NCR-525-17. *Toxicon* **25**: 1221-1227.

Manger, R.L. Leja, L.S., Lee, S.Y., Hungerford, J.M., Hokama, Y., Dickey, R.W., Granade, H.R., Lewis, R., Yasumoto, T., and Wekell, M.M. (1995) Detection of sodium

channel toxins: directed cytotoxicity assays of purified ciguatoxins, brevetoxins, saxitoxins and seafood extracts. *Journal of A.O.A.C. International* **78**: 521-527.

Mischke, U. (2003) Cyanobacteria associations in shallow polytrophic lakes: influence of environmental factors. *Acta Oecologica* **24**: 11-23.

Monestier, T. (2006) La problématique cyanobactéries sur le bassin versant de la Dordogne. Etude de cas: Retenue de Bort Les Orgues. Rapport de stage Master Environnement, 2^{ème} année, pp.68.

Moreno-Ostos, E., Cruz-Pizarro, L., Basanta, A., and Glen George, D. (2008) The spatial distribution of different phytoplankton functional groups in a Mediterranean reservoir. *Aquatic Ecology* **42**: 115-128.

Mur, L.R., and Schreurs, H. (1995) Light as a selective factor in the distribution of phytoplankton species. *Water Science Technology* **32**: 25-34.

Nalewajko, C., and Murphy, T.P. (2001) Effects of temperature and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in lake Biwa, Japan: an experimental approach. *Limnology* **2**: 45-48.

OECD (1982) Eutrophication of waters: Monitoring, assessment and control. Final report. OECD (Organization for Economic Cooperation and Development, eds). Environment Directorate, Paris, 154 pp.

Oliver, R.L., and Gant, G.G. (2000) Freshwater blooms. In *The Ecology of Cyanobacteria*. *Their diversity in time and space*. Whitton, B.A., and Potts, M. (eds). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 149-194.

Pereira, P., Onodera, H., Andrinolo, D., Franca, S., Araujo, F., Lagos, N., and Oshima, Y. (2000) Paralitic shellfish toxins in the freshwater cyanobacterium *Aphanizomenon flosaquae*, isolated from Montargil, Portugal. *Toxicon* **38**: 1689-1702.

Preussel, K., Stüken, A., Wiedner, C., Chorus, I., and Fastner, J. (2006) First report on cylindrospermopsin producing *Aphanizomenon flos-aquae* (Cyanobacteria) isolated from two German lakes. *Toxicon* **47**: 156-162.

Rajaniemi, P., Hrouzek, P., Kaštovská, K., Willame, R., Rantala, A., Hoffmann, L., Komárek, J., and Sivonen, K. (2005) Phylogenetic and morphological evaluation of the genera *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Trichormus* and *Nostoc* (Nostocales, cyanobacteria). *Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **55**: 11-26.

Rapala, J., Sivonen, K., Luukkainen, R., and Niemelä, S.I. (1993) Anatoxin-a concentration in *Anabaena* and *Aphanizomenon* under different environmental conditions and comparison of growth by toxic and non-toxic *Anabaena* strains, a laboratory study. *Journal of Applied Ecology* **5**: 581-591.

Reynolds, C.S., and Walsby, A.E. (1975) Water-blooms. Biological Review 50: 437-481.

Reynolds, C.S., and Bellinger, E.G. (1992) Patterns of abundance and dominance of the phytoplankton of Rostherne Mere, England: evidence from an 18-year data set. *Aquatic Sciences* **54**: 10-36.

Reynolds, C.S., Huszar, V., Kruk, C., Naselli-Flores, L., and Melo, S. (2002) Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* **24**: 417-428.

Rivasseau, C., Racaud, P., Deguin, A., and Hennion, M.C. (1999) Development of a bioanalytical phosphatase inhibition test for the monitoring of microcystins in environmental water samples. *Analytica Chimica Acta* **394**: 243-257.

Roijackers, R.M.M., and Joosten, A.M.T. (1996) The trophic state of shallow lakes in The Netherlands. *Netherlands Journal Aquatic Ecology* **30**: 219-226.

Ruban, V., Brigault, S., Fournier, A., and Restituito, F. (1999) Etude de l'eutrophisation de la retenue hydroélectrique de Bort Les Orgues, 51 pp.

Schreurs, H. (1992) Cyanobacterial dominance. In *Relations to eutrophication and lake morphology*. PhD Thesis. Amsterdam: University of Amsterdam.

See, J.H., Campbell, L., Richardson, T.L., Pinckney, J.L., Shen, R.J., and Guinasso, N.L. (2005) Combining new technologies for determination of phytoplankton community structure in the northern gulf of Mexico. *Journal of Phycology* **41**: 305-310.

Sivonen, K., and Jones, G. (1999) Cyanobacterial toxins. In *Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management.* Chorus, I., and Bartram, J. (eds). London: E. & F.N. Spon, pp. 41-111.

Talling, J.F., and Driver, D. (1963) Some problems in the estimation of chlorophyll *a* in phytoplankton. In *Conference on Primary Production Measurement Marine and Freshwater*. UAEC TID-7633 (ed.). Hawaï, pp. 142–146.

Thioulouse, J., Chessel, D., Dolédec, D., and Olivier, J.M. (1997) Ade-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing* **7**: 75-83.

Tsujimura, S., Ishikawa, K., and Tsukada, H. (2001) Effect of temperature on growth of the cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* in lake Biwa and lake Yogo. *Phycological Research* **49**: 275-280.

Utermölh, H. (1958) Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton Methodik. *Mitteilung Internationale Vereinigung für Theoretische unde Amgewandte Limnologie* **9**: 1-38.

Verhagen, J.H.G. (1994) Modeling phytoplankton patchiness under the influence of wind-driven currents in lakes. *Limnology and Oceanography* **39**: 1551-1565.

Viney, N.R., Bates, B.C., Charles, S.P., Webster, I.T., and Bormans, M. (2007) Modelling adaptative management strategies for coping with the impacts of climate variability and change on riverine algal blooms. *Global Change Biology* **13**: 2453-2465.

Vollenweider, R.A., and Kerekes, J.J. (1980) Synthesis report, Cooperative programme on monitoring of inland waters (Eutrophication Control). Report prepared on behalf of technical bureau, Water Management Sector Group, Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), Paris, pp 290.

Wallström, K., Johansson, S., and Larsson, U. (1992) Effects of nutrient enrichment on planktonic blue-green algae in the Baltic Sea. *Acta Phytogeographica Suecica* **78**: 25-31.

Walsby, A.E., Hayes, P.K., Boje, R., and Stal, L.J. (1997) The selective advantage of buoyancy provided by gas vesicles for planktonic cyanobacteria in the Baltic Sea. *New Phytologist* **136**: 407–417.

Yamamoto, Y., and Nakahara, H. (2005) The formation and degradation of cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* blooms: the importance of pH, water temperature and day length. *Limnology* **6**: 1-6.

VI. ANNEXES

Annexe 1 : Coordonnées GPS des points de prélèvements.

Station	Coordonnées Nord	Cordonnées Est		
La Dordogne	45° 33' 22 5''	2° 31' 12 4''		
Le Chavanon	45° 33' 15 2''	2° 30' 53 3''		
Point 1	45° 32' 35 8''	2° 31' 00 5''		
Point 1 bis	45° 31' 49 5''	2° 31' 07 2''		
Point 1ter	45° 31' 04 3''	2° 31' 03 4''		
Point 2	45° 28' 34 3''	2° 30' 26 2''		
Point 3	45° 27' 37 1''	2° 30' 26 8''		
Point 4	45° 26' 40 8''	2° 30' 16 0''		
Point 4 bis	45° 26' 14 8''	2° 29' 28 7''		
Point Siauve	45° 25' 44 1''	2° 30' 01 05''		
Point 5	45° 25' 28 7''	2° 29' 07 7''		
Point 5 bis	45° 25' 16 3''	2° 28' 55 9''		
Point 6 ter	45° 24' 56 6''	2° 29' 19 8''		
Point 6 bis	45° 24' 51 1''	2° 29' 15 1''		
Point 6	45° 24' 51 2''	2° 29' 33 8''		

Annexe 2: Sonde spectrofluorimétrique FluoroProbe (bbe-Moldaenke; Beutler et al., 2002).

Cette sonde fluorimétrique se base sur l'estimation de la quantité de pigments photosynthétiques comme approximation de la biomasse. Cet outil a pour avantage de donner une estimation en temps réel de la biomasse phytoplanctonique et de permettre un suivi au cours du temps plus aisé que celui permis par les méthodes conventionnelles.

La sonde enregistre la biomasse moyenne de chaque groupe fonctionnel en mesurant la fluorescence *in-vivo*



Sonde Fluoroprobe (Leboulanger, C.)

des pigments caractéristiques de chacun de ces groupes. La réponse de fluorescence des algues à l'excitation par la lumière visible dépend principalement de la chlorophylle a, un pigment trouvé dans tous les organismes phytoplanctoniques photosynthétiques. La distribution et la concentration des autres pigments sont caractéristiques des différents grands groupes d'algues. L'interaction de ces différents pigments avec la Chla aboutit à un spectre de fluorescence spécifique à une classe taxonomique d'algues. Des modèles de fluorescence sont ensuite utilisés pour évaluer l'abondance des différentes classes d'algues. La sonde possède des diodes qui émettent des impulsions de lumière aux longueurs d'ondes spécifiques induisant une fluorescence maximale des différents groupes d'algues : 450 nm pour les chlorophycées, 525 nm pour les algues brunes (diatomées et dinoflagellés), 570 nm pour les cryptophycées et 610 nm pour les cyanobactéries. L'émission à 370 nm permet de quantifier et de discriminer les substances humiques dissoutes. Ces substances sont en effet capables de réémettre de la fluorescence, il est donc nécessaire de pouvoir les discriminer de la biomasse phytoplanctonique. L'émission de la fluorescence par le phytoplancton et ces substances humiques dissoutes est mesurée à 680 nm, qui correspond à la longueur d'onde de réémission de la fluorescence par la Chla.

Le logiciel d'acquisition et de traitement des données (FluoroProbe 1.4) va redistribuer l'estimation de la Chla totale aux quatre grands groupes phytoplanctoniques discriminables par ce mode opératoire. L'estimation de la biomasse des différents groupes

phytoplanctoniques est exprimée en équivalent μg Chla L⁻¹ (eq. μg Chla L⁻¹).

La sonde est également équipée d'un capteur thermique estimant la température en temps réel et permettant d'observer rapidement la présence d'une stratification thermique dans la colonne d'eau.

<u>Annexe 3</u>: Système de limites de l'OECD proposées pour les catégories trophiques d'après Vollenweider and Kerekes (1980).

Niveau trophique	[P]	[Chla]	[max. Chla] Secchi		Secchi min	[N]
	μg L ⁻¹	$\mu g L^{-1}$	$\mu g L^{-1}$	m^{-1}	\mathbf{m}^{-1}	$\mu g L^{-1}$
Ultra-oligotrophe	< 4,0	< 1,0	< 2,5	< 12	< 6,0	
Oligotrophe	< 10,0	< 2,5	< 8,0	< 6,0	< 3,0	
Mésotrophe	10,0-35	2,5-8	8,0-25	6,0-3,0	3-1,5	< 350
Eutrophe	35-100	8,0-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7	350-650
Hypertrophe	> 100	> 25	> 75	> 1,5	> 0,7	650 - 1200

<u>Annexe 4</u>: Grille utilisée pour l'exploitation des données de qualité des cours d'eau (Interagences de l'eau, 2003).

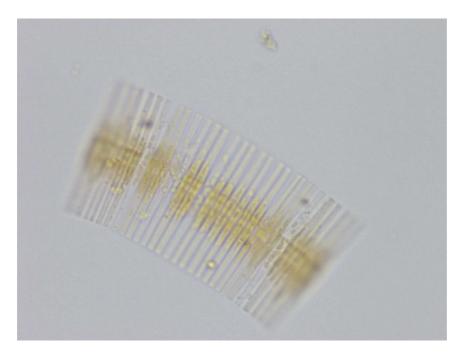
Code	Param	ètres	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Excessive
	Conductivité	μS cm ⁻¹	≤400	400 à 750	750 à 1500	1500 à 3000	>3000
	Chlorures	mg L ⁻¹	≤100	100 à 200	200 à 400	400 à 1000	>1000
	Température	°C	≤20	20 à 22	22 à 25	25 à 30	>30
	pН		6,5 à 8,5	_	6 à 6,5 ou 8,5 à 9	5,5 à 9,5	<5,5 ou >9,5
MES	Matières en suspension	mg L ⁻¹	≤30	_	-	30 à 70	>70
OX	O ₂ Dissous	mg L ⁻¹	>7	5 à 7	3 à 5	<u>≤</u> 3	_
	% Saturation	%	>90	70 à 90	50 à 70	≤50	_
Matières organiques (oxydables)	DBO	mg L ⁻¹	≤3	3 à 5	5 à 10	10 à 25	>25
(onj dabies)	DCO	$mg L^{-1}$	≤20	20 à 25	25 à 40	40 à 80	>80
Azote	NH_4	mg L ⁻¹	≤0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8	>8
	N-NH ₄	mg L ⁻¹	≤0,08	0,08 à 0,4	0,4 à 1,6	1,6 à 6	>6
	N K NO ₃	$mg L^{-1}$ $mg L^{-1}$	≤1 <5	1 à 2 5 à 25	2 à 3 25 à 50	>3 50 à 100	— >100
	N-NO3	mg L ⁻¹	<1,1	1,1 à 5,6	5,6 à 11,3	11,3 à 22,6	>22,6
Phosphore	PO_4 $P-PO_4$	mg L ⁻¹ mg L ⁻¹	<0,2 <0,065	0,2 à 0,5 0,065 à 0,16	0,5 à 1 0,16 à 0,326	1 à 5 0,326 à 1,63	>5 >1,63
	Phosphore total	l mg L ⁻¹	<0,1	0,1 à 0,25	0,25 à 0,5	0,5 à 2,5	>2,5

^{© 2003} Association Nationale pour la Protection des Eaux et Rivières

Annexe 5: Ecologie de Fragilaria crotonensis (Kitton, 1869).

Cette espèce appartient au groupe phytoplanctonique des **diatomées**. Ce sont des microalgues unicellulaires planctoniques (de 2 µm à 1 mm) présents dans tous les milieux aquatiques (avec une préférence pour les eaux froides) et enveloppés par un squelette externe siliceux (le frustule). Elles peuvent vivre isolées ou en colonie, être libres ou fixées, sous forme pélagique ou benthique. Les diatomées sont un constituant majeur du phytoplancton et jouent donc un rôle primordial dans la vie des écosystèmes aquatiques, à l'origine des réseaux alimentaires de nombreuses espèces.

L'espèce Fragilaria crotonensis est une diatomée pennée vivant en colonie.



Fragilaria crotonensis (Briand, E.)

Annexe 6: Ecologie d'Aphanizomenon flos-aquae (Woloszynska, 1912).

Le genre *Aphanizomenon* appartient à l'ordre des Nostocales, à la famille des Nostocacées. Organisme filamenteux (trichomes droits, solitaires ou en faisceaux), unisérié, non ramifié et sans gaine mucilagineuse. Les cellules, cylindriques ou en tonnelet voire très allongées, renferment la plupart du temps des pseudovacuoles. Constriction au niveau des cloisons absente ou peu marquée. Les hétérocytes, intercalaires et peu nombreux, sont toujours éloignés des akinètes (cylindriques, ellipsoïdaux ou sphériques) et sont généralement cylindriques et allongés. Les cellules apicales sont plus ou moins incolores, vacuolisées et selon croissance, un peu atténuées jusqu'à très effilées.



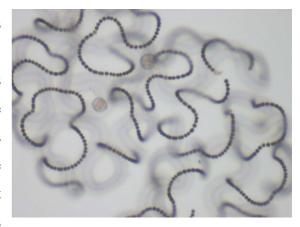
Aphanizomenon flos-aquae

Cette espèce planctonique peut engendrer de très importantes fleurs d'eau, bien visibles lorsque les faisceaux de trichomes s'accumulent en surface. Cette disposition groupée semble favoriser les migrations verticales, lorsque les eaux sont stratifiées. Cette espèce supporte mal des conditions turbulentes et elle est exigeante en lumière et en phosphore. *Aphanizomenon* est une espèce fixatrice d'azote atmosphérique grâce à ses hétérocytes. Cependant, lorsque le milieu est riche en azote dissous, les hétérocytes peuvent être totalement absents, d'où une possible confusion avec le genre *Planktothrix*. Le degré de vacuolisation des apex est variable, et semble dépendre des conditions environnementales (nutritives notamment).

Cette espèce peut potentiellement synthétiser un grand nombre de toxines : saxitoxines (Mahmood and Carmichael, 1986 ; Pereira *et al.*, 2000), anatoxine-a (Rapala *et al.*, 1993) et cylindrospermopsines (Preussel *et al.*, 2006). Bien que le genre *Aphanizomenon* ait des caractéristiques morphologiques différentes du genre *Anabaena*, des études phylogénétiques ont montré que ces deux genres étaient proches (Lyra *et al.* 1997, 2001 ; Gugger *et al.* 2002 ; Rajaniemi *et al.* 2005). Cependant, aucune souche d'*Aphanizomenon* produisant des microcystines n'a encore été observée.

Annexe 7: Ecologie d'Anabaena flos-aquae (Woloszynska, 1912).

Le genre *Anabaena* appartient à l'ordre des Nostocales, à la famille des Nostocacées. Cette espèce filamenteuse (trichomes solitaires, enroulés), unisériée, non ramifiée et sans gaine mucilagineuse, possède des cellules végétatives sphériques, en forme de tonneau ou cylindriques. Les hétérocytes sont intercalaires et jamais terminaux. Les akinètes sont éloignés des hétérocytes.



Anabaena flos-aquae (Briand, E.)

Cette espèce planctonique est inféodée aux eaux douces stagnantes sous toutes les latitudes. Fixatrice d'azote atmosphérique, elle supporte bien les milieux carencés en azote dissous et est souvent associée à des milieux mésotrophes à méso-eutrophes. *Anabaena* est plus exigeante en lumière que d'autres cyanobactéries filamenteuses (*Aphanizomenon*, *Planktothrix*, *Pseudanabaena*...) d'où sa prédilection pour des milieux calmes, transparents, voire stratifiés. Elle ne forme pas de colonies de forme définie mais des voiles à la surface des eaux.

Cette espèce est aussi susceptible de produire une grande variété de toxines : microcystines (Sivonen and Jones, 1999; Krienitz *et al.*, 2002), anatoxine-a (Delvin *et al.*, 1977; Carmichael *et al.*, 1979), anatoxine-a (S) (Mahmood and Carmichael, 1987).