

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES.....	4
INTRODUCTION.....	6
1. MATERIEL ET METHODE.....	7
1.1. MATERIELS.....	7
1.2. PROTOCOLE ET METHODOLOGIE.....	7
1.2.1. Les Paramètres	
1.2.2. Fréquence des campagnes de mesure	
1.2.3. Expression des résultats	
2. CONDITIONS CLIMATIQUES.....	12
2.1. TEMPERATURES.....	12
2.1.1. Moyennes annuelles	
2.1.2. Variations saisonnières	
2.2. PRECIPITATIONS.....	13
2.2.1. Moyennes annuelles	
2.2.2. Variations saisonnières	
2.3. DUREE DE L'INSOLATION.....	14
2.3.1. Moyennes annuelles	
2.3.2. Variations saisonnières	
3. PRESENTATION DES CAMPAGNES DE TERRAIN.....	15
4. ANALYSE DES DONNEES 2005 ET EVOLUTION TROPHIQUE.....	16
4.1. TENEURS EN NUTRIMENTS.....	16
4.1.1. DISTRIBUTIONS VERTICALES.....	16
4.1.2. VARIATIONS SAISONNIERES.....	17
4.1.2.1. Nitrates	
4.1.2.2. Phosphates	
4.1.2.3. Silice	
4.1.3. EVOLUTIONS INTERANNUELLES.....	22
4.2. TRANSPARENCE.....	25
4.2.1. VARIATION SAISONNIERE.....	25
4.2.2. EVOLUTION INTERANNUELLE.....	26
4.3. CHLOROPHYLLE "A".....	26
4.3.1. VARIATION SAISONNIERE.....	27
4.3.2. VARIATION INTER ANNUELLE.....	28

4.4. CYANOBACTERIES	29
4.4.1. DYNAMIQUE DES POPULATIONS	29
4.4.2. VARIATION SAISONNIERE	30
4.5. LES INDICES OXYGENE.....	31
4.5.1. DISTRIBUTION VERTICALE.....	31
4.5.2. VARIATION INTER ANNUELLE.....	32
4.5.2.1. Indice de sursaturation moyenne	
4.5.2.2. Indice de sous saturation moyenne	
4.5.2.3. Déficits et consommations hypolimniques	
CONCLUSION.....	40
BIBLIOGRAPHIE.....	42
ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Températures moyennes annuelles en °C.....	12
Tableau 2 : : Températures moyennes mensuelles de l'air en °C, année 2005 ; comparaison avec la moyenne des années 1974 – 2005.	12
Tableau 3 : Précipitations annuelles en mm.	13
Tableau 4 : Précipitations mensuelles en mm, année 2005 ; comparaison avec la moyenne des années 1974 – 2005.	13
Tableau 5 : Insolation annuelle en heures.	14
Tableau 6 : Durée d'insolation mensuelle (h), année 2005 ; comparaison avec la moyenne des années 1974 – 2005.	14
Tableau 7 : Nombre et répartition des campagnes de mesures et de prélèvements pour l'année 2005.	15
Tableau 8: Concentrations moyennes hivernales en nutriments au point B en 2005 et 2004.	22
Tableau 9: Concentrations hivernales maximales et moyennes en nitrates ($\text{mg.l}^{-1}\text{N}$) au point B entre 1981 et 2004.	23
Tableau 10 : Concentrations maximales et moyennes hivernales en phosphates ($\text{mg.l}^{-1}\text{P}$) au point B de 1981 à 2005.	23
Tableau 11 : Rapport NO_3/PO_4 au point B de 1981 à 2004.	24
Tableau 12 : Concentrations maximales et moyennes hivernales en SiO_2 et COT (mg.l^{-1}) au point B de 2003 à 2005.	25
Tableau 13 : Evolution de la transparence moyenne estivale au disque de Secchi (m) au point B de 1981 à 2005.	26
Tableau 14 : : Evolution des concentrations maximales et moyennes annuelles ($\mu\text{g.l}^{-1}$) en chlorophylle a sur la couche trophogène au point B de 1987 à 2005.	28
Tableau 15 : : Evolution des sursaturations en oxygène (mg.l^{-1}) à 2 m et maximales au point B de 1981 à 2005.	34
Tableau 16 : Evolution de la sous saturation en oxygène (mg.l^{-1}) au métalimnion au point B de 1981 à 2005.	35
Tableau 17 : Sous saturations moyennes annuelles en oxygène à 130 mètres (mg.l^{-1}) au point B, de 1981 à 2005.	37
Tableau 18 : Oxygène hypolimnique au point B en 2005 et en 2004 – déficits et consommations	38

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Comparaison des moyennes mensuelles de la température de l'air en 2005 et des moyennes historiques sur la période 1974 - 2005.....	12
Figure 2 : Comparaison des précipitations mensuelles (mm) en 2005 et des moyennes historiques sur la période 1974 - 2005.....	13
Figure 3 : Comparaison des durées d'insolation mensuelle (h), année 2005 avec la moyenne des années 1974 - 2005.....	14
Figure 4 : Distributions verticales des concentrations en nutriments au point B en période hivernale en 2005 (NO ₃ mg.l ⁻¹ N, PO ₄ mg.l ⁻¹ P, SiO ₂ mg.l ⁻¹).....	16
Figure 5 : Distributions verticales des concentrations en nutriments (mg.l ⁻¹) au point B en période de stratification thermique en 2005. (NO ₃ mg.l ⁻¹ N, PO ₄ mg.l ⁻¹ P, SiO ₂ mg.l ⁻¹).....	17
Figure 6 : Evolution des concentrations en nitrates (mg.l ⁻¹ N) au point B à 2 m en 2005.....	17
Figure 7 : Evolution des concentrations en nitrates (mg.l ⁻¹ N) au point B à 15 m en 2005....	18
Figure 8 : Evolution des concentrations en nitrates (mg.l ⁻¹ N) au point B à 80 m (—◆—), 110 m (- -■- -), 130 m (- -▲- -), 140 m (—x—) en 2005.....	19
Figure 9 : Evolution des concentrations en orthophosphates (mg.l ⁻¹ P) au point B dans l'épilimnion (—◆—)et le métalimnion (- -x- -) en 2005.....	19
Figure 10 : Evolution des concentrations en orthophosphates (mg.l ⁻¹ P) au point B à 30 m de profondeur en 2005.....	20
Figure 11 : Evolution des concentrations en phosphates (mg.l ⁻¹ P) au point B dans l'hypolimnion en 2005, 80 m (—◆—), 110 m (- -▲- -), 130 m (—x—), 140 m (— -+ -).....	21
Figure 12 : Evolution des concentrations en silice (mg.l ⁻¹) au point B dans l'épilimnion en 2005, 2 m (—◆—), 6 m (—*-), 10 m (- -▲- -),.....	21
Figure 13 : Evolution des concentrations en silice (mg.l ⁻¹) au point B dans l'hypolimnion en 2005. 110 m (—◆—),130 m (—*-), 140 m (- -▲- -).....	22
Figure 14 : Evolution des concentrations moyennes hivernales en nitrates (mg.l ⁻¹ N) au point A de 1981 à 2005.....	23
Figure 15 : Evolution des concentrations moyennes hivernales en phosphates (mg.l ⁻¹ P) au point B de 1981 à 2005.....	24
Figure 16 : Variation saisonnière de la Transparence (m) au disque de Secchi au point B en 2005.....	25
Figure 17 : Evolution des transparences moyennes estivales (m) au disque de Secchi au point B de 1981 à 2005.....	26
Figure 18 : Variation saisonnière des concentrations moyennes en Chlorophylle a (µg.l ⁻¹) sur la couche trophogène au point B en 2005.....	27
Figure 19 : Intégration du profil fluorimétrique.....	27
Figure 20 : Variation saisonnière des concentrations moyennes en Chlorophylle a (µg.l ⁻¹) sur la couche trophogène au point B en 2005 (—◆— choro tot, - -■- - diatomées, — -▲- — cyanobactéries).....	28
Figure 21 : Evolution des concentrations moyennes annuelles en chlorophylle a (µg.l ⁻¹) sur la couche trophogène au point B de 1981 à 2005.....	29
Figure 22 : Exemple de distributions des concentrations en cyanobactéries (µg.l ⁻¹ eq Chloro a) au point B au cours de l'année 2005.....	29
Figure 23 : Evolution de la biomasse en cyanobactéries (mg.m ⁻² eq Chloro a) au point B sur une colonne 0-40 m au cours de l'année 2005.....	30
Figure 24 : Distributions verticales des concentrations en oxygène (mg.l ⁻¹) au point B en 2005.....	32

Figure 25 : Variation saisonnière des concentrations en oxygène au niveau du métalimnion au point B en 2005.	33
Figure 26 : Evolution des indices moyens annuels de sursaturation en oxygène (mg.l^{-1}) à 2 m et maxi au point B de 1981 à 2005.	34
Figure 27 : Variation saisonnière des mesures et des saturations en oxygène (mg.l^{-1}) entre 15 et 35 m au point B en 2005.	35
Figure 28 : Evolution des indices moyens annuels de sous saturation en oxygène (mg.l^{-1}) entre 15 et 35 m au point B de 1981 à 2005.	35
Figure 29 : Variation saisonnière des mesures et des saturations en oxygène (mg.l^{-1}) à 130 m au point B en 2005.	36
Figure 30 : Evolution des teneurs en oxygène en mg.l^{-1} de saturation à 130 mètres au point B de 1985 à 2005.	37
Figure 31 : Evolution de l'indice de sous saturation moyen annuel en oxygène (mg.l^{-1}) à 130 mètres au point B de 1981 à 2005.	37
Figure 32 : Oxygène hypolimnique - Evolution de la consommation annuelle au point B de 1984 à 2005 (mg.l^{-1}).	39
Figure 33 : Oxygène hypolimnique - Evolution de la consommation journalière au point B de 1984 à 2005 ($\text{mg.m}^{-3}\text{j}^{-1}$).	39

INTRODUCTION

La mise en place d'un suivi allégé par le CEMAGREF sur le lac du Bourget date de 1981 et fait suite à la mise en service des premiers grands travaux de restauration concernant le lac.

L'objectif premier du suivi allégé est de décrire l'évolution trophique du lac du Bourget. Il doit être considéré comme un outil scientifique de gestion qui revêt plusieurs niveaux d'intérêts :

- Permettre aux collectivités locales, maîtres d'ouvrage des principaux travaux d'assainissement, de juger de leur efficacité vis-à-vis de l'amélioration de la qualité des eaux du lac
- Constituer une base de données utilisable dans le cadre d'études scientifiques plus lourdes

Les premières actions du contrat de bassin versant du lac du Bourget, approuvé par le Ministère de l'Environnement et signé en 2002, ont été engagées en 2003. En matière d'assainissement, ce contrat succède à deux programmes de restauration portés par les collectivités locales :

- ✗ Lutte contre la pollution dans les années 1970 – 1980
- ✗ 2^{ème} phase des travaux de protection et d'amélioration de la qualité des eaux du lac du Bourget dans les années 1990 – 2000

Ces travaux ont eu comme conséquence de réduire les charges externes en nutriments arrivant au lac principalement par le réseau hydrographique, notamment le phosphore qui passe de 300 t.an⁻¹ dans les années 70 à une centaine de tonnes à la fin des années 90.

Ainsi la diminution des apports externes a eu des résultats probants sur les taux de nutriments dans le lac et sur la biodiversité floristique (*ECOTEC, 2000*).

Paradoxalement, en dépit de cette diminution des concentrations en nutriments, nous observons à certaines périodes et depuis quelques années, des proliférations d'espèces potentiellement toxiques qui perturbent le fonctionnement mais aussi les usages du lac.

Pour parfaire l'assainissement domestique des 65 communes du bassin versant du lac, les actions du contrat ont débuté en 2004 et elles devraient réduire les rejets en nutriments, micropolluants et germes pathogènes arrivant au lac comme cela a été défini dans les objectifs.

Le suivi allégé est intégré au contrat de bassin versant du lac du Bourget au titre du volet C3 de ce contrat : *Suivi de la qualité des eaux et des écosystèmes aquatiques*.

Cette année, il vient en complément à d'autres études plus fondamentales :

- suivi lourd engagé en 2004/2005 et réalisé par la station de limnologie de l'INRA de Thonon les Bains.
- Programme de recherche : DYLACHEM qui engage une dizaine de laboratoires de recherche nationaux.

1. MATERIEL ET METHODE

À travers des paramètres correctement choisis, le suivi allégé a pour but de suivre qualitativement le sens d'évolution de l'état trophique d'un lac.

Il permet en particulier d'apprécier l'impact des actions de protection et de restauration du milieu au regard de la qualité des eaux du lac.

1.1. MATERIELS

Matériels de mesures et de prélèvements

- ⇒ Un disque de SECCHI (30 cm de diamètre)
- ⇒ Une bouteille d'échantillonnage intégré de type PELLETIER
- ⇒ Une bouteille de prélèvement de type NISKIN
- ⇒ Deux filets à plancton de mailles respectives : 60 et 200 µm.
- ⇒ Une sonde multiparamètres SEABIRD SBE 19 Seacat profiler possédant les capteurs suivants : pression, température, oxygène, pH et conductivité
- ⇒ Une sonde fluorimétrique immergeable BBE-Moldaenke
- ⇒ Un treuil et un câble de 200 m de long
- ⇒ Un ordinateur avec logiciel d'acquisition de données Seasoft et fluoroprobe
- ⇒ Un oxymètre WTW.

1.2. PROTOCOLE ET METHODOLOGIE

La méthode consiste à collecter, à la verticale de la profondeur maximale du lac (point B : N 45°44,814' – E 5°51,609' ; 145 mètres environ de profondeur), les données de quelques descripteurs caractéristiques de son état trophique.

Les paramètres, les niveaux et les fréquences des mesures ont été définis à partir d'études menées sur le lac du Bourget de 1972 à 1981 (CEMAGREF, 1982).

Fondé sur des techniques simples et peu coûteuses, ce suivi a montré l'efficacité des mesures initiales qui ont été prises pour réduire les apports en nutriments et le passage de la qualité des eaux du lac d'une situation critique vers un état méso-eutrophe. L'étude de 1995/96 montrait en outre qu'un décalage s'établissait entre la qualité globale du lac, en particulier du point de vue biologique, et l'image qu'en donne le suivi allégé, fait apparaître la nécessité de réviser le suivi par l'intégration de nouveaux descripteurs :

- La filière minérale ; avec la silice, nutriment majeur pour certaines algues (diatomées)
- La filière organique (carbone organique) dont l'importance dans l'alimentation des chaînes trophiques en énergie semble s'accroître
- Les cyanobactéries, suite au constat de leur recrudescence épisodique et à la mise en évidence de la présence d'espèces toxiques lors de périodes où elles sont normalement rares (en décembre 1998 par exemple).
La méthodologie a été définie par l'INRA, station d'hydrobiologie lacustre, à partir d'une étude préliminaire au contrat de bassin versant : « *Mise en place d'un protocole de surveillance des cyanobactéries dans le lac du Bourget* ».

1.2.1. Les Paramètres

La caractéristique essentielle du suivi allégé est la continuité temporelle. Le nombre des descripteurs doit donc être réduit aux plus représentatifs du phénomène étudié afin de limiter le coût financier de l'étude.

Les descripteurs retenus pour le suivi allégé du lac du Bourget sont :

- Les nutriments
 - nitrate (NO_3)
 - phosphate (PO_4)
 - phosphore total (Ptot)
 - silice
 - COT
- La transparence
- La chlorophylle a
- L'oxygène (et la température)
- Les cyanobactéries.

Nutriments

Principe : L'azote et le phosphore sont considérés comme les aliments de base de l'eutrophisation dont ils sont la cause. Ces éléments existent sous diverses formes ; minérales ou organiques, dissoutes ou particulaires. Les nitrates (NO_3) et les phosphates (PO_4) constituent une forme minérale soluble directement assimilable par les producteurs primaires.

La silice est essentiellement d'origine géologique. Elle provient de la décomposition des aluminosilicates minéraux par l'acide carbonique.

Cet élément constitue un nutriment majeur pour certaines algues, en particulier les diatomées, dont l'enveloppe externe (frustule) est constituée de silice hydratée amorphe très pure ($\text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$).

Méthode : Les échantillons sont prélevés à différentes profondeurs (2, 15, 30, 50, 80, 110, 130 et 140 m) pendant les mois de janvier, février et mars à l'aide d'une bouteille de prélèvement type NISKIN. Les analyses sont effectuées depuis 1991 par SAVOIE LABO selon les normes

- NF EN 1189 pour le phosphore
- NF EN ISO 13 395 pour les nitrates
- NF EN ISO 11885 pour la Silice
- NF EN 1484 pour le carbone organique.

En 2005 les analyses ont été réalisées par le laboratoire de l'INRA Station limnologique de Thonon.

Transparence

Principe : Elle est fonction de la quantité de matières en suspension dans l'eau, de la biomasse phyto et zooplanctonique. Pour le grand public c'est le paramètre le plus représentatif de la qualité des eaux d'un plan d'eau.

Méthode : Elle s'exprime par la profondeur en mètres au-delà de laquelle un disque blanc de 30 cm de diamètre (disque de SECCHI), immergé dans le lac, n'est plus visible à l'œil nu.

Chlorophylle "a"

Principe : Pour des raisons pratiques, il a été convenu de doser la concentration en chlorophylle pour mesurer la biomasse du phytoplancton. Ce dosage constitue le volet biologique du suivi allégé.

Méthode : On effectue un échantillon moyen sur toute l'épaisseur de la couche euphotique à l'aide d'une bouteille à prélèvement intégré. L'épaisseur de la couche euphotique est fonction de la transparence et représente théoriquement 2,5 fois la transparence mesurée au SECCHI.

Les échantillons sont ensuite filtrés sur papier Whatman GFC (1.2 µm). Le dosage de la chlorophylle est réalisé par un laboratoire extérieur (SAVOIE LABO) suivant la méthode normalisée NFT 90-117 (meth.Laurenzen).

Oxygène

Principe : L'activité chlorophyllienne des végétaux enrichit les couches supérieures de l'eau en oxygène et dans les couches inférieures où la lumière ne pénètre plus, la respiration des micro-organismes fait baisser le taux d'oxygène.

Cette activité biologique entraîne ainsi, grâce à la photosynthèse, une sursaturation en oxygène dans les couches superficielles et, en raison notamment de la minéralisation de la matière organique, une sous saturation en oxygène dans les couches profondes.

Méthode : On établit un profil de concentration en oxygène dissous (en mg.l⁻¹ et en % de saturation) à la verticale de la profondeur maximale du lac à l'aide d'une sonde multi-paramètres. L'indice annuel est calculé aux trois niveaux de mesure prédéfinis. L'indice représente la moyenne pondérée des sursaturations à 2 m et au métalimnion et de la sous saturation à 130 m.

Cyanobactéries

Principe : Lors des épisodes de prolifération, les cyanobactéries posent de multiples problèmes liés notamment à leur capacité de synthétiser des toxines dangereuses pour les animaux mais aussi pour l'homme. Les proliférations de *P. rubescens* dans le lac du Bourget ont motivé la mise en place d'un plan de surveillance. Les cyanobactéries sont des organismes procaryotes possédant des pigments chlorophylliens. Le principe de la mesure repose sur les capacités de fluorescence des algues phytoplanctoniques.

Méthode : Utilisation d'une sonde fluorimétrique immergeable qui fournit directement des estimations de la biomasse phytoplanctonique en équivalent µg de chlorophylle a.

On établit les profils des concentrations des principales classes d'algues présentes dans le lac de 0 à 45 m de profondeur à partir desquels on définit les variations verticales et saisonnières des concentrations en cyanobactéries.

1.2.2. Fréquence des campagnes de mesure

Les rythmes d'évolution des phénomènes lacustres annuels justifient deux fréquences de campagnes différentes.

- Campagnes hebdomadaires du 1^{er} Avril au 30 Septembre.

Les conditions de température et d'ensoleillement du printemps au début de l'automne favorisent les activités biologiques (regain printanier de phytoplancton, forte production primaire, minéralisation, poussée phytoplanctonique automnale), les fluctuations du milieu sont rapides et

nombreuses. L'observation de ces phénomènes successifs justifie des campagnes plus fréquentes pendant ces périodes.

- Campagnes mensuelles le reste de l'année.

1.2.3. Expression des résultats pour le suivi allégé

Rappel des indices retenus pour suivre l'évolution trophique du lac du Bourget selon la méthode du suivi allégé (CEMAGREF 1981).

- ⇒ Teneur en fertilisants au moment du brassage hivernal : les nitrates en mg.l^{-1} de N et le phosphore total en mg.l^{-1} de P
- ⇒ Teneur en chlorures en mg.l^{-1} de Cl^- au moment du brassage hivernal
- ⇒ Transparence moyenne estivale en mètres
- ⇒ Concentration moyenne annuelle en chlorophylle a (en mg.m^{-3})
- ⇒ Sursaturation en oxygène à 2 mètres (en mg.l^{-1})
- ⇒ Sous saturation maximale en oxygène dans le métalimnion (en mg.l^{-1})
- ⇒ Sous saturation en oxygène à 130 mètres (en mg.l^{-1})
- ⇒ Le déficit à l'origine et le déficit maximal en oxygène hypolimnique (en mg.l^{-1})
- ⇒ La consommation journalière et annuelle de l'oxygène hypolimnique respectivement en mg.l^{-1} et en $\text{mg.m}^{-3}.\text{j}^{-1}$.

Teneurs moyennes en Nitrates et Phosphates

Ces indices calculés au moment du brassage hivernal représentent les réserves maximales du lac en nutriments lorsque la consommation est minimale et l'homothermie presque totale. Les moyennes retenues sont les moyennes arithmétiques des concentrations mesurées à 2, 15, 30, 50, 80, 110, 130, et 140 mètres en janvier, février et mars.

Moyenne annuelle de la transparence

La valeur annuelle retenue est la moyenne des mesures pondérées par l'écart entre les campagnes.

Dans le calcul de la moyenne on prend en compte uniquement les valeurs situées à l'intérieur de la période où la transparence passe au-dessus de 5 m pour la première fois de l'année et où elle descend au-dessous de 5 m pour la dernière fois.

On s'affranchit ainsi de la période hivernale où la transparence a peu de relation avec l'activité biologique.

Moyenne annuelle en chlorophylle a dans la couche euphotique

L'indice annuel est la moyenne des mesures pondérées par l'écart entre les campagnes.

L'oxygène

Les indices retenus sont les moyennes pondérées des **sursaturations** et des **sous saturations** aux différents niveaux.

Les moyennes pondérées sont le résultat du quotient A/T .

A : différence entre les concentrations et la saturation en oxygène pondérée par le temps

T : temps écoulé entre les deux points de croisement des courbes

Déficit hypolimnique à l'origine : il mesure le défaut de réalimentation du lac en oxygène durant la période de mélange ; il est représenté par l'aire comprise entre la courbe des teneurs réelles et la courbe des teneurs théoriques de saturation divisée par l'épaisseur de

l'hypolimnion (110 m) pendant la période de mélange, soit de Janvier à Mars suivant les années.

Déficit hypolimnique maximal : il donne une idée de l'oxygénation de l'hypolimnion à l'époque la plus défavorable. Le calcul est identique au précédent mais il s'établit à la fin de la période de stratification thermique.

Consommation hypolimnique annuelle : déficit maximal - déficit à l'origine.

Consommation hypolimnique journalière : Consommation annuelle divisée par le nombre de jours séparant deux campagnes de mesures.

2. CONDITIONS CLIMATIQUES

L'analyse des données météorologiques est nécessaire pour situer les caractéristiques des années étudiées par rapport aux données historiques. Les données proviennent de la station météorologique de Voglans située à proximité du lac du Bourget. Nous devons préciser que nous ne faisons pas une véritable analyse météorologique : il s'agit d'avoir une indication de l'environnement climatique dans lequel le lac du Bourget se situe pour l'année d'étude.

2.1. TEMPERATURES

2.1.1. Moyenne annuelle

Tableau 1 : Températures moyennes annuelles en °C

année	Temp moy °C
2005	11,2
1974-2005	11,2

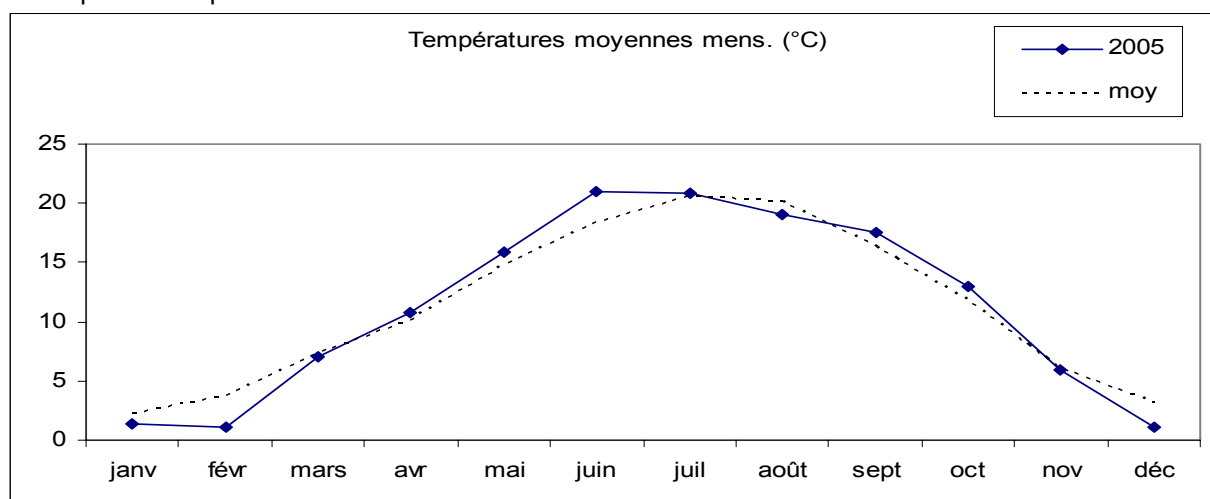
Après 8 années consécutives présentant des valeurs supérieures à la moyenne annuelle calculée sur trente ans, l'année 2005 retrouve une valeur égale à cette moyenne mais la tendance de ces 20 dernières années reste à une légère augmentation (*Annexe 1*).

2.1.2. variations saisonnières

Tableau 2 : : Températures moyennes mensuelles de l'air en °C, année 2005 ; comparaison avec la moyenne des années 1974 – 2005.

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
2005	1,4	1,1	7,1	10,7	15,8	21	20,9	19,1	17,6	12,9	5,9	1,1
74-05	2,3	3,8	7,3	10,1	14,8	18,3	20,6	20,2	16,3	11,7	6,0	3,1
Δ %	-38,0	-70,2	-3,1	5,9	7,1	14,7	1,5	-5,5	7,6	10,4	-2,1	-65,1

Figure 1 : Comparaison des moyennes mensuelles de la température de l'air en 2005 et des moyennes historiques sur la période 1974 - 2005.



Les variations mensuelles pendant l'année 2005 fluctuent autour des valeurs moyennes tout au long de l'année entre +14 et -70 %.

Les mois de janvier, février, août et décembre présentent des déficits parfois importants (février avec -70%, décembre avec -65%).

Les températures froides des mois de janvier et février ont été particulièrement favorables au processus d'homogénéisation des eaux du lac pendant cette période.
Par ailleurs nous notons des excédents en mai - juin et septembre – octobre jusqu'à +14% par rapport aux moyennes historiques.

2.2. PRECIPITATIONS

2.2.1. Cumul annuel

Tableau 3 : Précipitations annuelles en mm.

Année	Pluviométrie mm
2005	888
1974-2005	1268
Δ	380

Globalement, l'année 2005 présente, comme l'année 2003, un déficit hydrique qui se situe autour de **-30%** et se révèle être la deuxième année la plus sèche de ces 30 dernières années (*Annexe 1*).

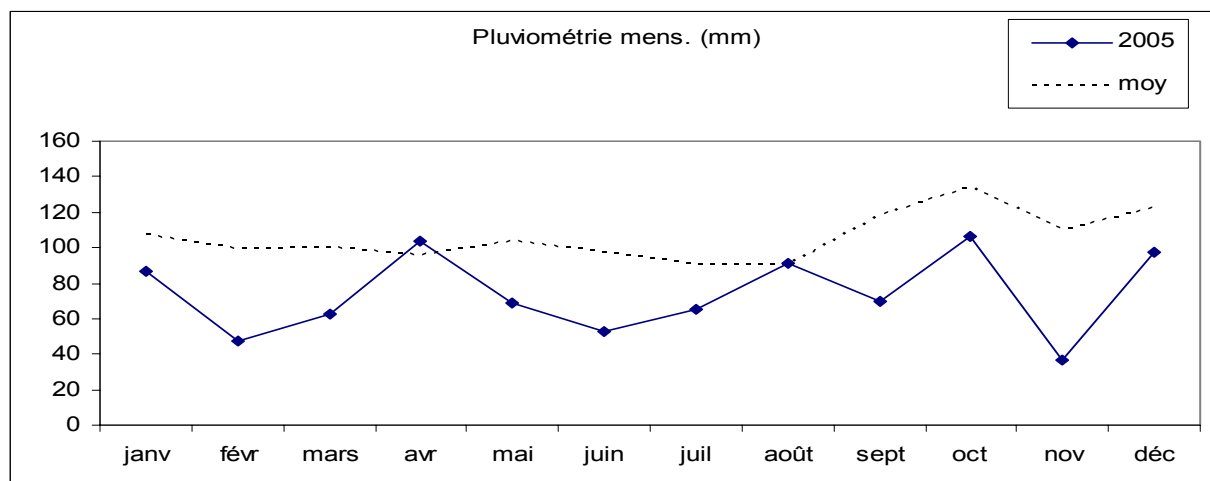
C'est aussi la troisième année consécutive qui présente un déficit de hauteur de pluie entre -19 et -30% par rapport à la moyenne sur trente ans.

2.2.2. Variations saisonnières

Tableau 4 : Précipitations mensuelles en mm, année 2005 ; comparaison avec la moyenne des années 1974 – 2005.

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	mai	juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
2005	86,4	47,4	62,8	103,6	69,2	53	65,2	90,8	69,6	106,0	36,8	97,2
74-05	107,6	99,1	100,4	95,5	103,3	97,8	90,1	90,3	117,7	134,0	109,8	122,6
Δ %	-19,7	-52,2	-37,4	8,5	-33,0	-45,8	-27,6	0,6	-40,9	-20,9	-66,5	-20,7

Figure 2 : Comparaison des précipitations mensuelles (mm) en 2005 et des moyennes historiques sur la période 1974 - 2005.



Pour l'année 2005, l'évolution saisonnière de la pluviométrie présente un déficit hydrique 10 mois sur 12 entre -20% en janvier et -66 % en novembre.

- De janvier à mars : -20 à -50%
- De mai à juillet : -27 à -45%

- De septembre à décembre : -20 à -66%.

Seuls les mois d'avril et d'août présentent des valeurs proches de la moyenne

2.3. DUREE DE L'INSOLATION

2.3.1. Cumul annuel

Tableau 5 : Insolation annuelle en heures.

Année	Insolation heures
2005	1978
1974-2005	1887

L'année 2005 reste proche de la moyenne historique, elle présente un excédent d'environ 5% (*Annexe 1*).

2.3.2. Variations saisonnières

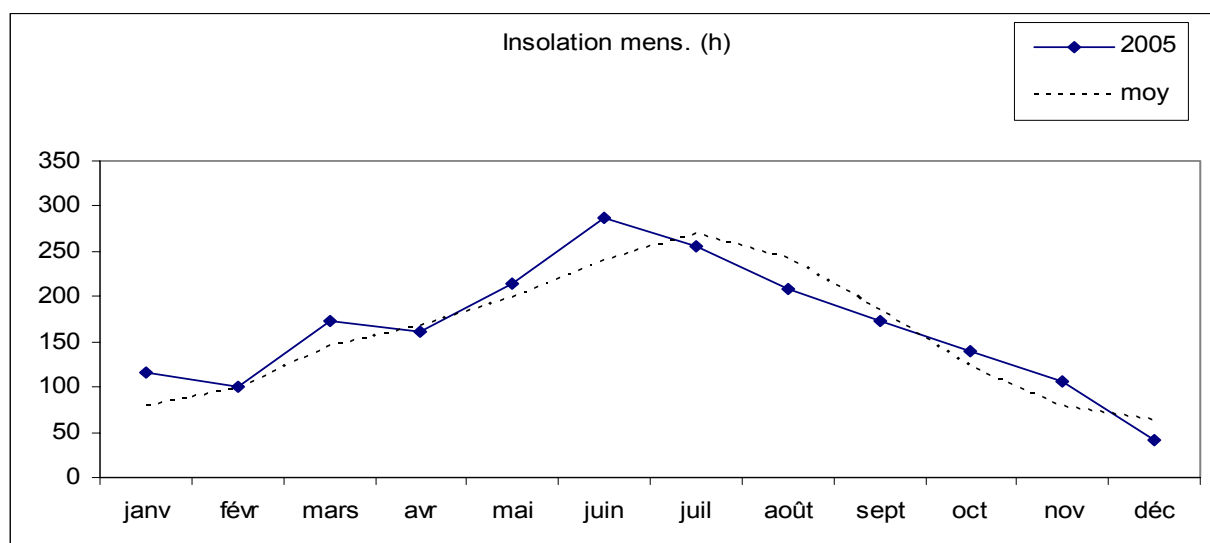
Tableau 6 : Durée d'insolation mensuelle (h), année 2005 ; comparaison avec la moyenne des années 1974 – 2005.

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.
2005	116	101	174	161	215	287	255	209	172	139	107	42
74-05	78	99	146	167	198	239	270	243	184	121	79	63
Δ %	48,6	1,5	18,9	-3,4	8,7	19,9	-5,3	-13,8	-6,5	14,3	36,2	-33,8

Au cours de l'année 2005, les valeurs mensuelles oscillent entre -34% et +48% autour des valeurs moyennes

La figure 3 montre un excédent de la durée d'insolation (48% à 20%) de janvier à juin puis en automne favorisant en partie la reprise de la croissance phytoplanctonique pendant cette période (cf. fig.20).

Figure 3 : Comparaison des durées d'insolation mensuelle (h), année 2005 avec la moyenne des années 1974 – 2005.



3. PRESENTATION DES CAMPAGNES DE TERRAIN

En 2005, nous avons effectué 38 campagnes ; ce nombre est un peu plus élevé que celui prévu par le protocole du Suivi Allégé en raison de programmes d'étude complémentaire qui ont nécessité des sorties supplémentaires (DYLACHEM, Etude lourde).

La répartition des dates des campagnes au cours de l'année est précisée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Nombre et répartition des campagnes de mesures et de prélèvements pour l'année 2005.

Date	Profil temp - O2	profil fluo	Transp. Secchi	Prélèvement intégré	Prélèvement NISKIN													
					SBE 19+	BBE	Chloro a	Nutriments - NO3 - PO4 - Ptot - COD - SiO2										
								Couche euphotique	2	6	10	15	20	30	50	80	110	130
11/1/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x			x	x			
8/2/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
24/2/05	X	X	X															
2/3/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x							
15/3/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
21/3/05	X	X	X	X														
1/4/05	X	X	X	X														
5/4/05	X	X	X		x	x	x	x	x	x	x							
14/4/05	X	X	X	X														
20/4/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
4/5/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x							
11/5/05		X	X	X														
16/5/05	X	X	X		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
19/5/05			X															
26/5/05	X	X	X	X														
2/6/05	X	X	X	X														
10/6/05	X	X	X															
16/6/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x							
23/6/05	X	X	X	X														
28/6/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
12/7/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x							
20/7/05	X	X	X	X														
26/7/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
3/8/05	X	X	X	X														
10/8/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x							
18/8/05	X	X	X	X														
24/8/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x							
1/9/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
6/9/05	X	X	X	X														
14/9/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x							
26/9/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
5/10/05	X	X	X	X														
11/10/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
24/10/05	X	X	X		x	x	x	x	x	x	x							
9/11/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
17/11/05	X	X	X	X														
30/11/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
12/12/05	X	X	X	X	x	x	x	x	x	x	x				x			
Total	36	37	38	32	22	22	22	22	22	22	22	11	11	12	13			

4. ANALYSE DES DONNEES 2005 ET EVOLUTION TROPHIQUE

4.1. TENEURS EN NUTRIMENTS

4.1.1. DISTRIBUTIONS VERTICALES

Annexes 2 à 7

Pendant la période hivernale (période de circulation des eaux), les concentrations en nutriments montrent une relative homogénéité sur toute l'épaisseur de la colonne d'eau (*fig. 4*)

entre **0,52 et 0,61 mg.l⁻¹ N** pour les nitrates

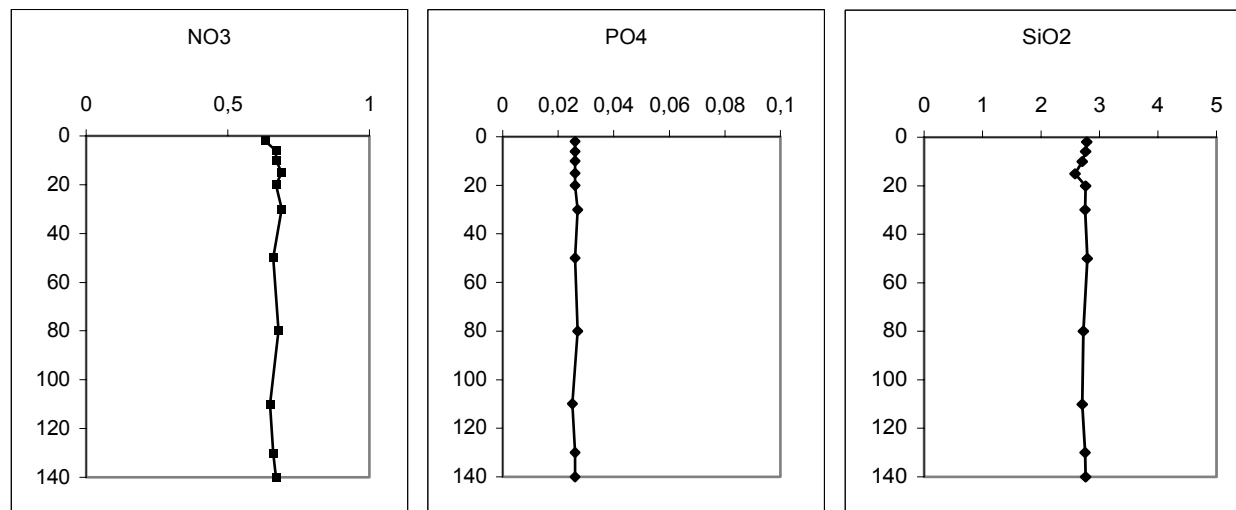
entre **0,021 et 0,024 mg.l⁻¹ P** pour les phosphates

entre **0,021 et 0,027 mg.l⁻¹ P** pour le phosphore total

entre **2,58 et 2,79 mg.l⁻¹** pour la Silice

entre **1,88 et 1,97 mg.l⁻¹** pour le Carbone total

Figure 4 : Distributions verticales des concentrations en nutriments au point B en période hivernale en 2005 (NO₃ mg.l⁻¹N, PO₄ mg.l⁻¹P, SiO₂ mg.l⁻¹).



Au cours du réchauffement printanier, l'établissement d'une stratification thermique dans le lac conduit à la séparation des eaux superficielles et des eaux profondes ; en conséquence, on observe l'apparition d'une stratification chimique liée à l'isolement des deux compartiments : l'épilimnion et l'hypolimnion.

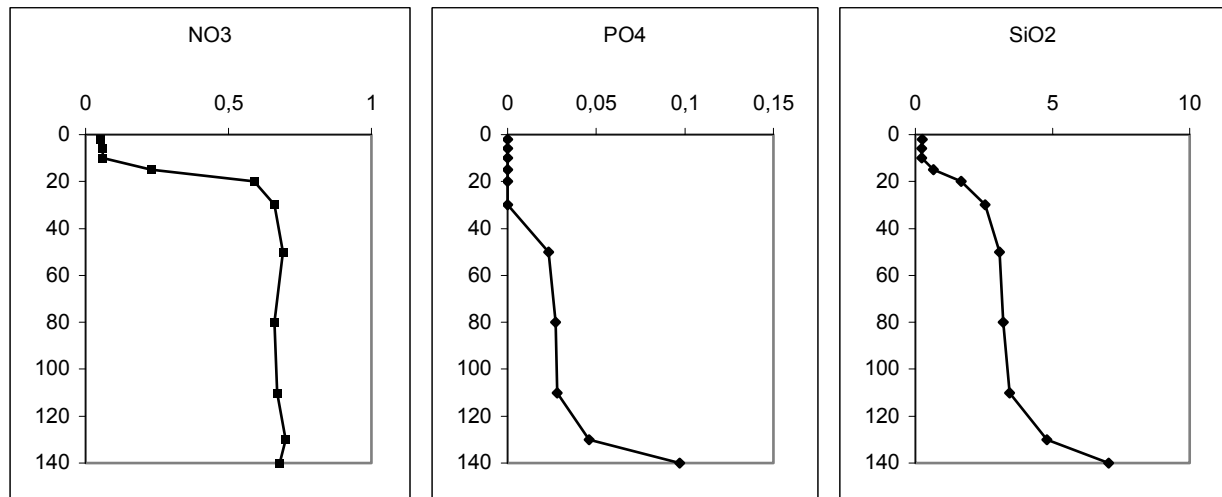
La distribution verticale des nutriments reste assez semblable à celle de l'année 2004.

Dans les eaux de surface, la réaction prédominante est la photosynthèse et on observe alors une consommation des nutriments par les organismes autotrophes ; cela se traduit par une diminution progressive des concentrations :

- Les concentrations en nitrates restent faibles autour de 0,1 mg.l⁻¹ entre 0 et 6 mètres de profondeur pendant près de trois mois (juillet à octobre) à 10 mètres de profondeur pendant près de deux mois (août à octobre).
- les phosphates restent inférieurs à 5 µg.l⁻¹ de mai à décembre entre 0 et 20 m de profondeur de juillet à décembre à 30 m.
- La silice entre 0 et 10 m montre des concentrations inférieures à 1 mg.l⁻¹ du mois de juin à novembre.

Dans les eaux profondes et dans un premier temps, les réactions d'oxydation de la matière organique sont prépondérantes. L'augmentation des concentrations des nutriments en fonction de la profondeur traduit les réactions de minéralisation et de relargage benthique (fig. 5).

Figure 5 : Distributions verticales des concentrations en nutriments (mg.l^{-1}) au point B en période de stratification thermique en 2005. ($\text{NO}_3 \text{ mg.l}^{-1}\text{N}$, $\text{PO}_4 \text{ mg.l}^{-1}\text{P}$, $\text{SiO}_2 \text{ mg.l}^{-1}$)



4.1.2. VARIATIONS SAISONNIERES

Les concentrations mesurées tout au long de l'année permettent de suivre les évolutions saisonnières des différents nutriments à différentes profondeurs :

Epilimnion : 2 m

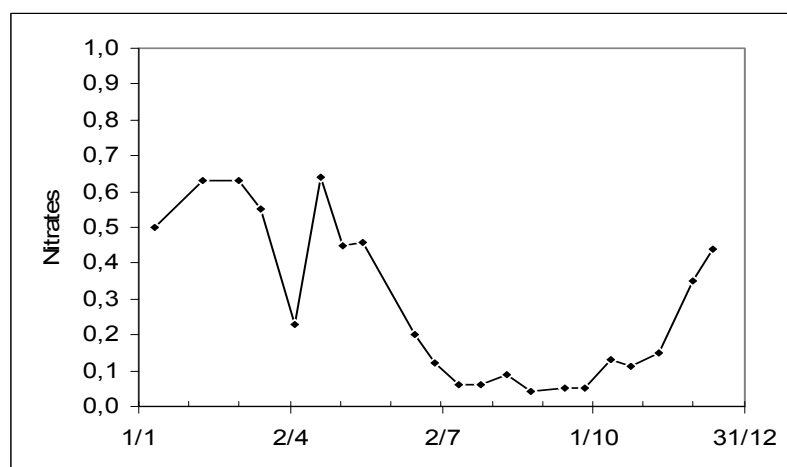
Métalimnion : 15 m

Hypolimnion : 80, 110, 130, 140 m

4.1.2.1. Nitrates

Epilimnion : 2 m (fig. 6)

Figure 6 : Evolution des concentrations en nitrates ($\text{mg.l}^{-1}\text{N}$) au point B à 2 m en 2005.



Les concentrations en nitrates à 2 mètres de profondeur sont maximales en hiver (**0,63 $\text{mg.l}^{-1}\text{N}$**) pendant la période de faible croissance phytoplanctonique.

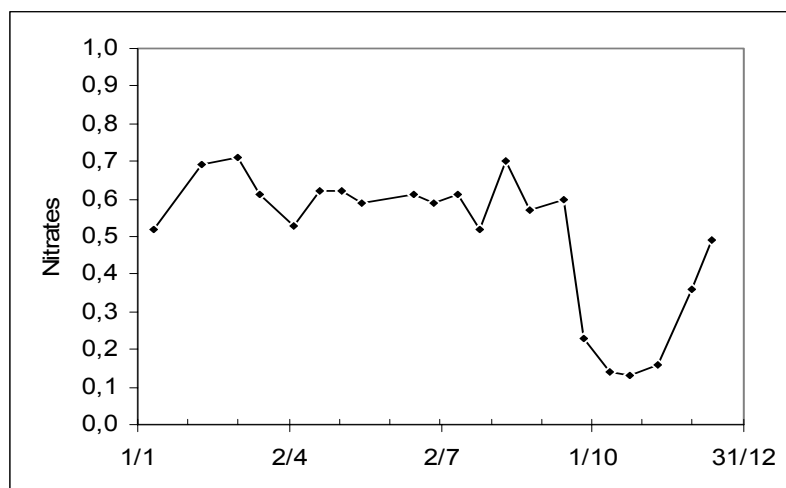
Puis on observe une première consommation rapide par les organismes photosynthétiques (poussée diatomique) limitée dans le temps ; en effet, les concentrations en nitrates passent de 0,55 à 0,23 entre le 15 mars et le 5 avril (20 jours) pour remonter tout aussi rapidement (de 0,23 à 0,63 mg.l⁻¹ N en 15 jours).

Par la suite ces concentrations diminuent progressivement en fonction de l'utilisation des nutriments par les organismes chlorophylliens jusqu'au mois de juillet (**0,060 mg.l⁻¹N** le 12/07). Les concentrations restent faibles (\approx 0,1 mg.l⁻¹ N) pendant les mois de juillet, d'août et de septembre mais ne s'annulent pas contrairement aux observations faites en 2004. Ces concentrations augmentent de nouveau assez rapidement en automne avec le refroidissement et l'enfoncement de la thermocline (**de 0,15 à 0,44 mg.l⁻¹N** en un mois).

Métalimnion (fig. 7)

Après un maximum en hiver (**0,71 mg.l⁻¹ N**), les concentrations restent relativement constantes autour d'une valeur de 0,60 mg.l⁻¹ N jusqu'au mois de septembre ; elles diminuent à partir du 14 septembre de façon assez rapide pour atteindre 0,13 mg.l⁻¹ N le 24/10 puis remontent pratiquement aussi rapidement (0,49 mg.l⁻¹ N) en relation l'enfoncement de la thermocline.

Figure 7 : Evolution des concentrations en nitrates (mg.l⁻¹N) au point B à 15 m en 2005.



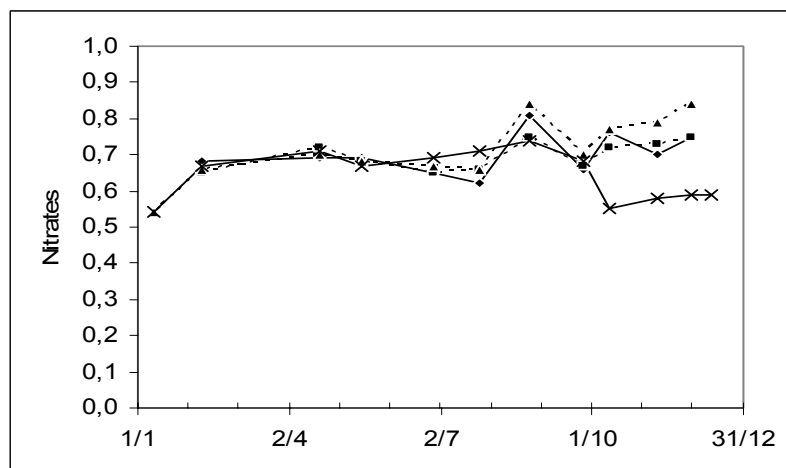
Hypolimnion : 80, 110, 130, 140 m (fig. 8)

Les évolutions saisonnières des concentrations en nitrates entre 80 et 140 mètres de profondeur restent assez semblables au cours de l'année 2005.

Les concentrations augmentent lentement de janvier à novembre entre **0,70** et **0,84 mg.l⁻¹ N** (minéralisation).

À partir du mois d'octobre, avec l'aggravation des déficits en oxygène mesurés à proximité du fond, les concentrations en nitrates à 140 m présentent des valeurs plus faibles par rapport à celles des niveaux supérieurs (apparition de formes réduites de l'azote).

Figure 8 : Evolution des concentrations en nitrates ($\text{mg.l}^{-1}\text{N}$) au point B à 80 m (—◆—), 110 m (- -■- -), 130 m (- -▲- -), 140 m (—×—) en 2005.



4.1.2.2. Phosphates

Epilimnion et métalimnion (fig. 9)

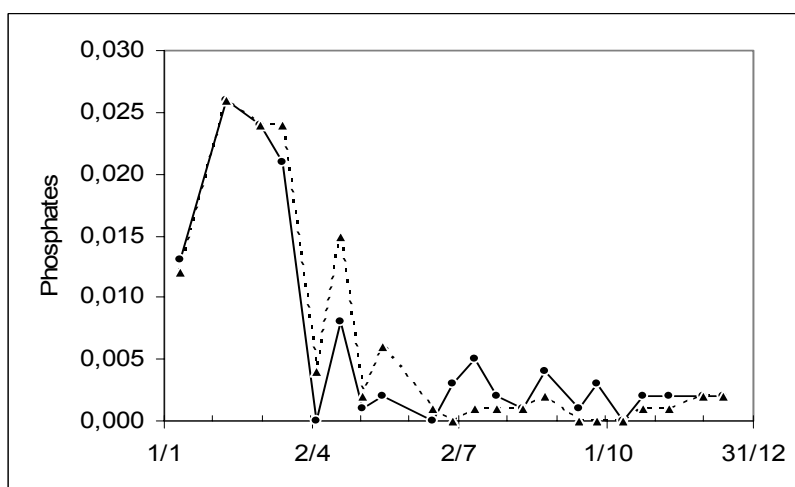
De 2 à 20 mètres de profondeur les variations saisonnières suivent une évolution relativement similaire.

Les concentrations, maximales au moment de la phase d'homogénéisation des eaux ($26 \mu\text{g.l}^{-1}\text{P}$), présentent une diminution assez rapide dès le mois de mars ; elles passent de 21 à $0 \mu\text{g.l}^{-1}\text{P}$ en 20 jours entre le 15/03 et le 05/04, illustrant ainsi la consommation des phosphates par les organismes chlorophylliens lors de la phase de production printanière (poussées des diatomées).

A la suite, semble-t-il, d'un arrêt de la production primaire et donc de la consommation des nutriments, les concentrations remontent ensuite pratiquement aussi rapidement le 20 avril.

A partir du mois de mai, les concentrations restent relativement faibles jusqu'au mois de décembre ($<5 \mu\text{g.l}^{-1}\text{P}$).

Figure 9 : Evolution des concentrations en orthophosphates ($\text{mg.l}^{-1}\text{P}$) au point B dans l'épilimnion (—◆—) et le métalimnion (- -×- -) en 2005.



30 m (fig. 10)

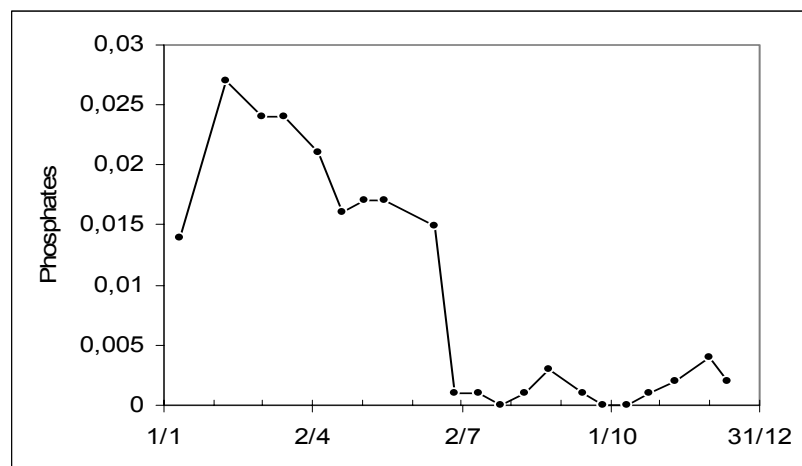
Après être passé par un maximum à $27 \mu\text{g.l}^{-1} \text{P}$ en février les concentrations en phosphates à 30 m de profondeur diminuent dans un premier temps progressivement jusqu'à $15 \mu\text{g.l}^{-1} \text{P}$ en 4 mois du 08/08 au 16/06, puis plus rapidement pour atteindre $1 \mu\text{g.l}^{-1} \text{P}$ le 28/06 (en 12 jours)

Depuis quelques années, de juillet à octobre, nous observons à cette profondeur une consommation des orthophosphates ($[\text{Ortho P}] < 5 \mu\text{g.l}^{-1} \text{P}$) tandis que les concentrations en nitrates restent quasiment constantes ($0,72 \text{mg.l}^{-1} \text{N}$). L'utilisation des orthophosphates à 30 m de profondeur ne peut s'expliquer par une activité photosynthétique (absence de lumière) mais éventuellement par l'activité d'organismes hétérotrophes (protozoaires, bactéries) et/ou des cyanobactéries.

Par la suite, elles restent faibles jusqu'à la fin de l'année ($< 5 \mu\text{g.l}^{-1} \text{P}$).

Depuis quelques années, de juillet à octobre, nous observons à cette profondeur une diminution des phosphates ($[\text{Ortho P}] < 5 \mu\text{g.l}^{-1} \text{P}$) tandis que les concentrations en nitrates restent quasiment constantes ($0,75 \text{mg.l}^{-1} \text{N}$). La consommation des orthophosphates à 30 m de profondeur ne peut s'expliquer par une activité photosynthétique (absence de lumière).

Figure 10 : Evolution des concentrations en orthophosphates ($\text{mg.l}^{-1} \text{P}$) au point B à 30 m de profondeur en 2005.

**Hypolimnion : 80, 110, 130 et 140 m (fig. 11)**

Au début de l'année les concentrations en phosphates sont élevées en liaison avec la persistance d'une légère stratification thermique qui n'a pas encore permis le mélange et la réoxygénation des eaux profondes.

Au moment de la phase de circulation des eaux, au mois de mars, les concentrations sont homogènes dans tout l'hypolimnion et égales à $0,024 \text{mg.l}^{-1} \text{P}$.

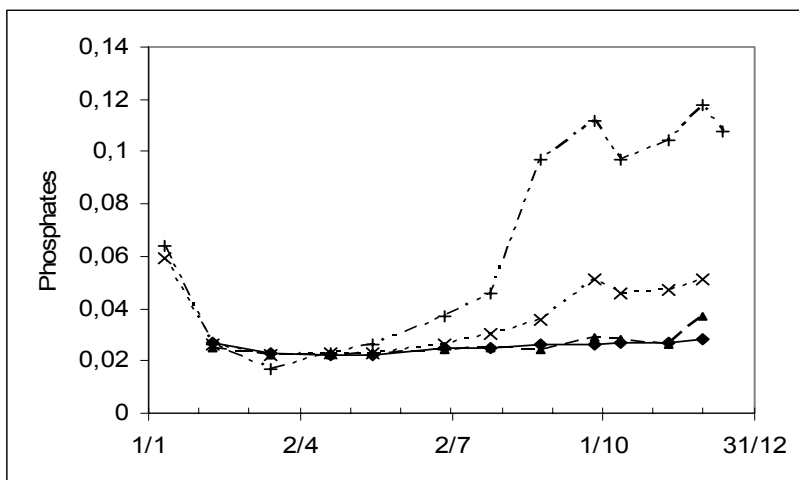
A partir des mois de mai et juin les concentrations ont tendance à augmenter jusqu'au mois d'octobre, l'augmentation est d'autant plus importante que l'on se rapproche du fond, ce phénomène étant directement lié à l'apparition du déficit en oxygène et à son aggravation constaté à ces profondeurs au cours du cycle annuel (relargage de phosphore).

- **$0,028 \text{mg.l}^{-1} \text{P}$** à 80 mètres
- **$0,037 \text{mg.l}^{-1} \text{P}$** à 110 mètres
- **$0,051 \text{mg.l}^{-1} \text{P}$** à 130 mètres

- **0,118 mg.l⁻¹ P** à 140 mètres.

Les maxima en 2005 restent sensiblement inférieurs à ceux des années précédentes, respectivement
 0,040, 0,060, 0,120 et >0,300 mg.l⁻¹ P en 2003
 0,030, 0,041, 0,100 et >0,200 mg.l⁻¹ P en 2004

Figure 11 : Evolution des concentrations en phosphates (mg.l⁻¹P) au point B dans l'hypolimnion en 2005, 80 m (—◆—), 110 m (- -▲- -), 130 m (—×—), 140 m (—+—).



4.1.2.3. Silice

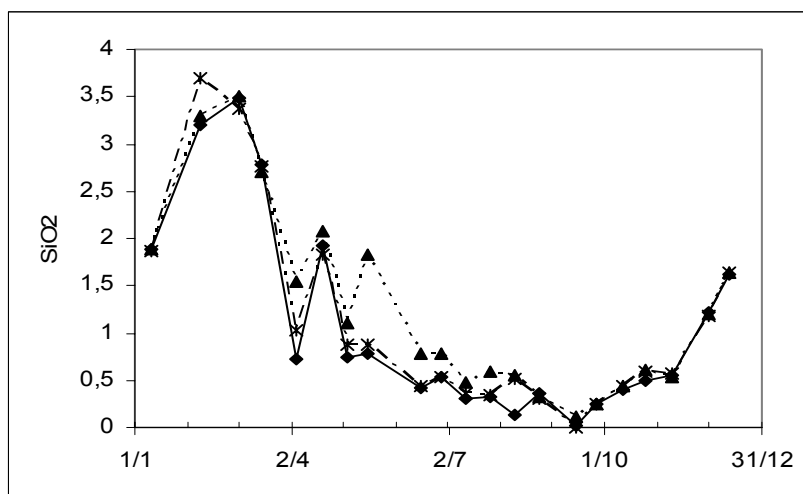
Epilimnion : 2, 6, 10 m (fig. 12)

L'évolution temporelle des concentrations est assez comparable à celle des autres nutriments :

- Maximum pendant la phase de circulation des eaux entre 3,49 et 3,69 mg.l⁻¹
- Diminution rapide fin mars - début avril liée au développement printanier des diatomées
- Les concentrations restent inférieures à 1 mg.l⁻¹ jusqu'au mois de novembre puis remontent légèrement à la fin de l'année autour de 1,5 mg.l⁻¹.

Figure 12 : Evolution des concentrations en silice (mg.l⁻¹) au point B dans l'épilimnion en 2005, 2 m (—◆—), 6 m (—*—), 10 m (- -▲- -),.

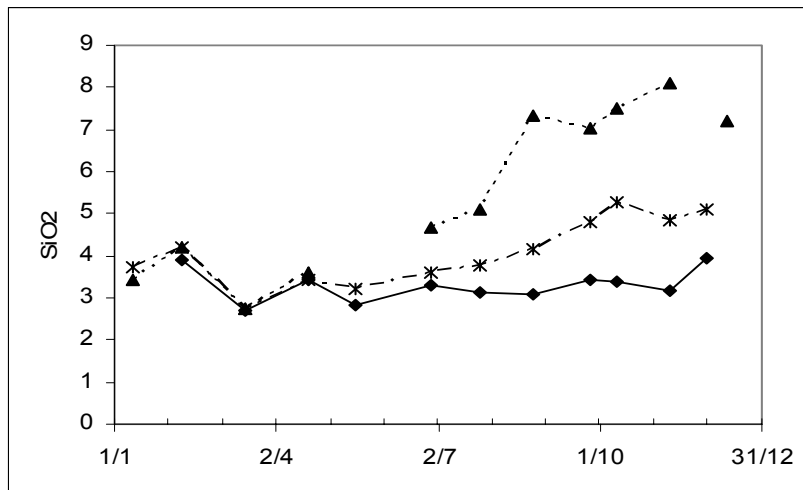
2



Dans l'hypolimnion

- maximum en fin d'année, à partir du mois de juillet les concentrations sont d'autant plus grandes que l'on se rapproche du fond, respectivement de **3,95**, **5,27** et **8,08** mg.l⁻¹ à 110, 130 et 140 m de profondeur

Figure 13 : Evolution des concentrations en silice (mg.l⁻¹) au point B dans l'hypolimnion en 2005. 110 m (—◆—), 130 m (—*—), 140 m (—▲—).



4.1.3. EVOLUTIONS INTERANNUELLES

Les concentrations moyennes hivernales en nutriments, calculées selon le protocole du suivi allégé, constituent un indicateur de l'évolution des stocks disponibles pour le développement algal. Globalement elles sont toutes légèrement inférieures aux valeurs de 2004, excepté pour la silice.

Tableau 8: Concentrations moyennes hivernales en nutriments au point B en 2005 et 2004.

	unité	2005	2004
Nitrates	mg.l ⁻¹ N	0,65	0,72
Phosphates	mg.l ⁻¹ P	0,024	0,029
Phosphore total	mg.l ⁻¹ P	0,031	0,033
SiO ₂	mg.l ⁻¹	3,35	2,95
COT	mg.l ⁻¹	1,91	2,07

LES NITRATES

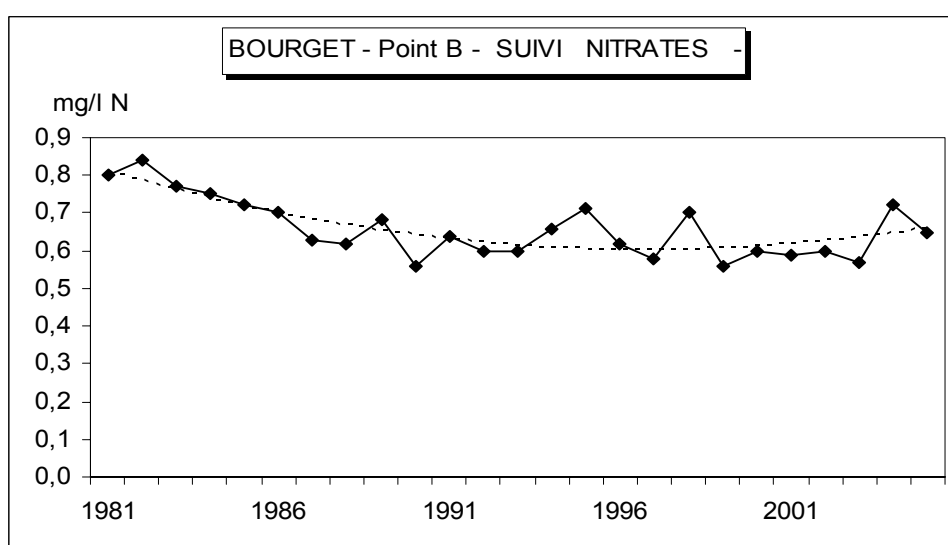
La valeur calculée pour 2005 (**0,65 mg.l⁻¹ N**) est légèrement inférieure aux moyennes hivernales de l'année précédente, on retrouve une valeur comparable à celle de l'année 1998.

La valeur en 2005 ne remet pas en cause les conclusions des années précédentes, à savoir une relative stabilité de ce paramètre autour d'une valeur moyenne de **0,62 mg.l⁻¹ N** après la diminution des concentrations moyennes hivernales en nitrates jusqu'en 1990 malgré une variabilité inter annuelle des valeurs difficile à rattacher à des événements simples (1995, 1998, 2004).

Tableau 9 : Concentrations hivernales maximales et moyennes en nitrates ($\text{mg.l}^{-1}\text{N}$) au point B entre 1981 et 2004.

NO3 $\text{mg.l}^{-1}\text{N}$	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
.Max	0,88	0,85	0,80	0,77	0,75	0,70	0,70	0,70	0,72	0,68	0,68	0,68	0,65	0,74
.Moyenne	0,80	0,84	0,77	0,75	0,72	0,70	0,63	0,62	0,68	0,56	0,64	0,60	0,60	0,66

NO3 $\text{mg.l}^{-1}\text{N}$	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
.Max	0,81	0,70	0,65	0,76	0,61	0,77	0,68	0,65	0,67	0,76	0,74
.Moyenne	0,71	0,62	0,58	0,70	0,56	0,60	0,59	0,60	0,57	0,72	0,65

Figure 14 : Evolution des concentrations moyennes hivernales en nitrates ($\text{mg.l}^{-1}\text{N}$) au point A de 1981 à 2005.

LES PHOSPHATES

Bien qu'un peu inférieure aux années précédentes, la valeur 2005 reste conforme à celles calculées depuis 1999 (**0,024 $\text{mg.l}^{-1}\text{P}$**) ; elle retrouve une valeur quasi identique à celles des années 2003, 2002...

Après une phase de diminution des concentrations moyennes hivernales de 1981 à 1999 (de 0,120 à 0,020 $\text{mg.l}^{-1}\text{P}$), le suivi met en évidence une certaine stabilité de ce paramètre entre **0,020 et 0,024 $\text{mg.l}^{-1}\text{P}$** (moyenne : 0,024 $\text{mg.l}^{-1}\text{P}$).

Sur la base des modèles OCDE d'évaluation de la catégorie trophique, cette valeur confère au lac un niveau mésotrophe.

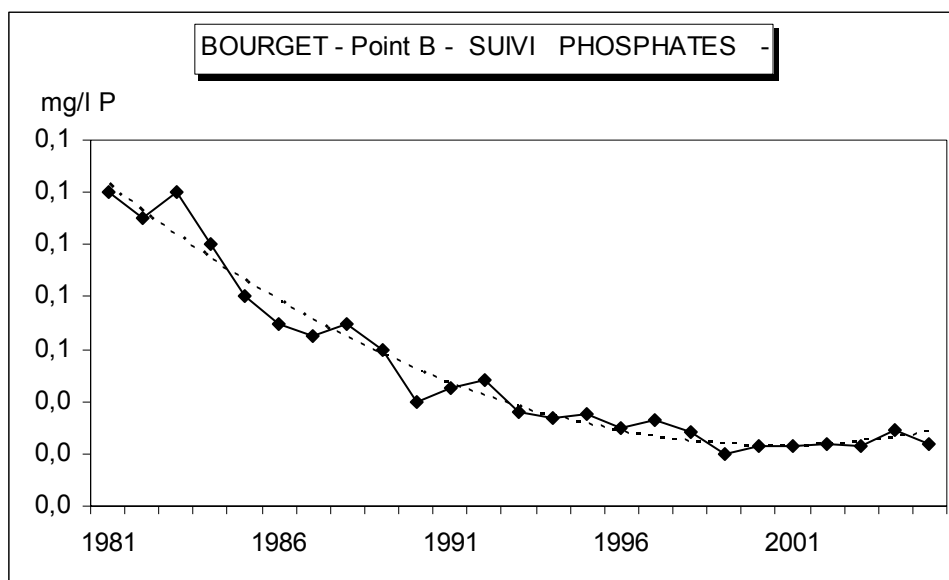
Tableau 10 : Concentrations maximales et moyennes hivernales en phosphates ($\text{mg.l}^{-1}\text{P}$) au point B de 1981 à 2005.

PO4 $\text{mg.l}^{-1}\text{P}$	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
.Maximum	0,15	0,12	0,13	0,12	0,09	0,08	0,08	0,07	0,1	0,08	0,06	0,067	0,059	0,051
.Moyenne	0,120	0,110	0,120	0,100	0,080	0,070	0,065	0,070	0,060	0,040	0,045	0,048	0,036	0,034

PO4 $\text{mg.l}^{-1}\text{P}$	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
.Maximum	0,15	0,12	0,13	0,12	0,09	0,08	0,08	0,07	0,1	0,08	0,06
.Moyenne	0,120	0,110	0,120	0,100	0,080	0,070	0,065	0,070	0,060	0,040	0,045

.Maximum	0,052	0,073	0,036	0,042	0,021	0,042	0,078	0,05	0,033	0,030	0,027
.Moyenne	0,035	0,030	0,033	0,028	0,020	0,023	0,023	0,024	0,023	0,029	0,024

Figure 15 : Evolution des concentrations moyennes hivernales en phosphates ($\text{mg.l}^{-1}\text{P}$) au point B de 1981 à 2005.



EVOLUTION DU RAPPORT NITRATES/PHOSPHATES

Tableau 11 : Rapport NO_3/PO_4 au point B de 1981 à 2004.

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
. NO_3/PO_4	6,67	7,64	6,42	7,50	9,00	10,00	9,69	8,86	11,33	14,00	14,22	12,50	16,67	19,41
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005			
. NO_3/PO_4	20,29	20,67	17,58	25,00	28,00	26,09	25,65	25,00	24,78	24,83	27,08			

Avec toutes les précautions quant à l'utilisation du rapport N/P pour définir quel est du phosphore ou de l'azote le facteur limitant (Barroin, 2004), nous pouvons cependant observer l'évolution du rapport nitrates/phosphates depuis 1981. Ce rapport montre, de 1981 à 1999, une augmentation assez rapide puis semble se stabiliser autour d'une valeur moyenne égale à 25,5. Il semble conférer plus au phosphore le rôle d'élément limitant. En effet, les phosphates s'épuisent plus rapidement que les nitrates dans l'épilimnion lors de la poussée phytoplanctonique printanière (fig. 6 et 9).

LA SILICE ET CARBONE TOTAL

Bien que légèrement supérieures pour la silice et inférieures pour le carbone organique total, aussi bien pour les moyennes que pour les valeurs maximales, les concentrations hivernales restent du même ordre de grandeur que celles des années 2003 et 2004.

Tableau 12 : Concentrations maximales et moyennes hivernales en SiO₂ et COT (mg.l⁻¹) au point B de 2003 à 2005.

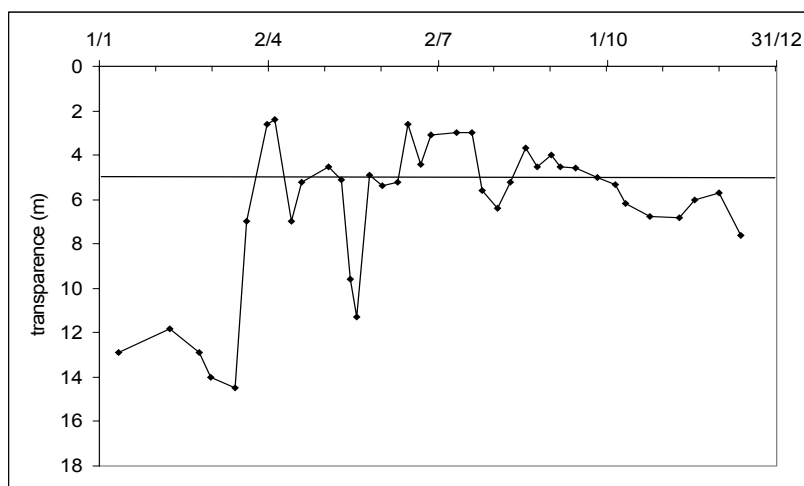
SiO ₂ mg.l ⁻¹	2003	2004	2005
.Maximum	3,50	3,91	4,40
.Moyenne	2,76	2,95	3,35

COT mg.l ⁻¹	2003	2004	2005
.Maximum	2,04	2,16	2,02
.Moyenne	1,7	2,07	1,91

4.2. TRANSPARENCE

4.2.1. VARIATION SAISONNIERE

En l'absence d'eaux turbides ou de remise en suspension des sédiments qui peuvent occasionnellement se produire dans les zones côtières, la transparence est essentiellement déterminée par l'abondance du phytoplancton.

Figure 16 : Variation saisonnière de la Transparence (m) au disque de Secchi au point B en 2005.

L'évolution de la transparence au cours de l'année 2005 est moins typique cette année.

En effet, on observe au début de l'année une transparence élevée entre 12 et 14,5 mètres jusqu'au 15 mars. Cette période est suivie d'une diminution très rapide, de 14,5 à 2,6 m en une quinzaine de jours, (soit -0,70 m/j par rapport à -0,24 m/j en 2004) qui traduit un démarrage rapide de la production primaire favorisé par une élévation des températures et de l'ensoleillement après un mois de février assez froid et peu ensoleillé ; cette observation est corroborée par la consommation rapide des nutriments par les organismes photosynthétiques dans l'épilimnion pendant cette même période (fig. 6, 9).

Une période d'eaux claires apparaît au début du mois d'avril entre le 5 et le 14/04 (2,4 à 7 m) et présente un maximum le 19/05 avec 11,3 m. cette phase d'augmentation de la transparence n'est pas progressive mais est interrompue par une nouvelle phase de croissance algale début mai.

Dès le mois de juin la transparence passe sous la valeur de 5 mètres (2,6 m) puis va augmenter irrégulièrement jusqu'au mois de décembre pour atteindre la valeur de 7,6 mètres le 12.

4.2.2. EVOLUTION INTERANNUELLE

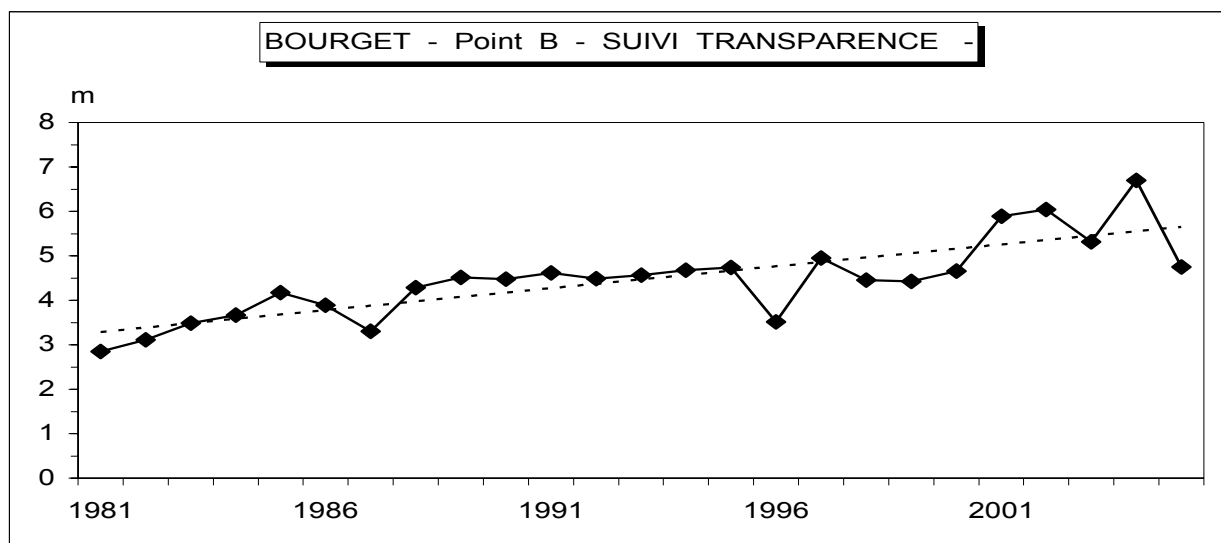
La transparence estivale pour l'année 2005 avec **4,75 mètres** présente la valeur la plus faible depuis l'année 2000 (phase des eaux claires moins marquée, transparence minimale à 2,40 m) mais s'inscrit normalement dans le sens général d'évolution de ce paramètre constaté les années précédentes.

Depuis 1981, les valeurs indiquent une augmentation de la transparence estivale (\approx de 3,0 à 5,5 m) qui peut être considérée comme une amélioration du niveau trophique à travers ce descripteur (fig. 17).

Tableau 13 : Evolution de la transparence moyenne estivale au disque de Secchi (m) au point B de 1981 à 2005.

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Tr	2,85	3,11	3,48	3,67	4,17	3,89	3,30	4,28	4,52	4,47	4,61	4,49	4,57	4,67
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005			
Tr	4,74	3,52	4,95	4,45	4,42	4,66	5,89	6,04	5,31	6,70	4,75			

Figure 17 : Evolution des transparences moyennes estivales (m) au disque de Secchi au point B de 1981 à 2005.



4.3. CHLOROPHYLLE A

Les valeurs de chlorophylle a correspondent aux concentrations mesurées sur un échantillon intégré dans la couche euphotique, l'indice retenu pour le suivi étant la moyenne pondérée. La teneur en chlorophylle a de l'eau d'un lac est considérée comme un indice d'abondance du phytoplancton. Cependant l'analyse de l'évolution de ce paramètre est délicate en raison de la variabilité des teneurs en chlorophylle a selon l'espèce d'algue.

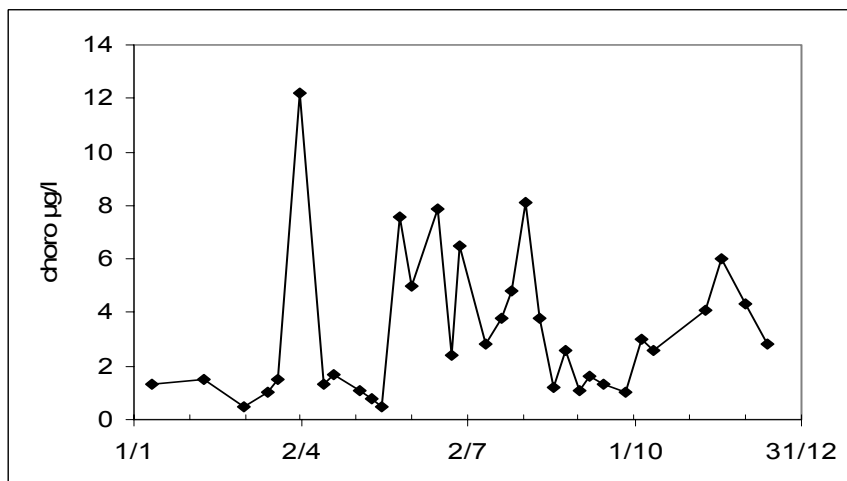
4.3.1. VARIATION SAISONNIERE

Les différentes phases de production primaire se traduisent par une succession de pics chlorophylliens. On observe trois pics de biomasse (*fig. 18*) :

- le premier très court début avril avec $12,2 \mu\text{g.l}^{-1}$
- un deuxième en juin-juillet avec une concentration maximum de $8,1 \mu\text{g.l}^{-1}$
- le troisième vers la fin de l'année avec $8,3 \mu\text{g.l}^{-1}$.

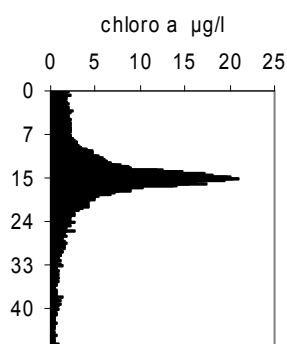
Le reste de l'année la concentration en chlorophylle *a* oscille entre 1 et $4 \mu\text{g.l}^{-1}$.

Figure 18 : Variation saisonnière des concentrations moyennes en Chlorophylle *a* ($\mu\text{g.l}^{-1}$) sur la couche trophogène au point B en 2005.



Analyse des données fluorimétriques fournies par la sonde :

Figure 19 : Intégration du profil fluorimétrique



Pour étudier l'évolution saisonnière de la biomasse phytoplanctonique à partir des profils de sonde fluorimétrique ; chaque profil est intégré sur une couche d'eau d'une épaisseur correspondant à la couche trophogène (= 2,5 fois la valeur de la transparence mesurée au disque de Secchi, OCDE), épaisseur dans laquelle se développent les algues la plus grande partie de l'année.

Nous pouvons visualiser, à partir de la figure 20, les différentes phases de production primaire qui se traduisent par une succession de pics chlorophylliens.

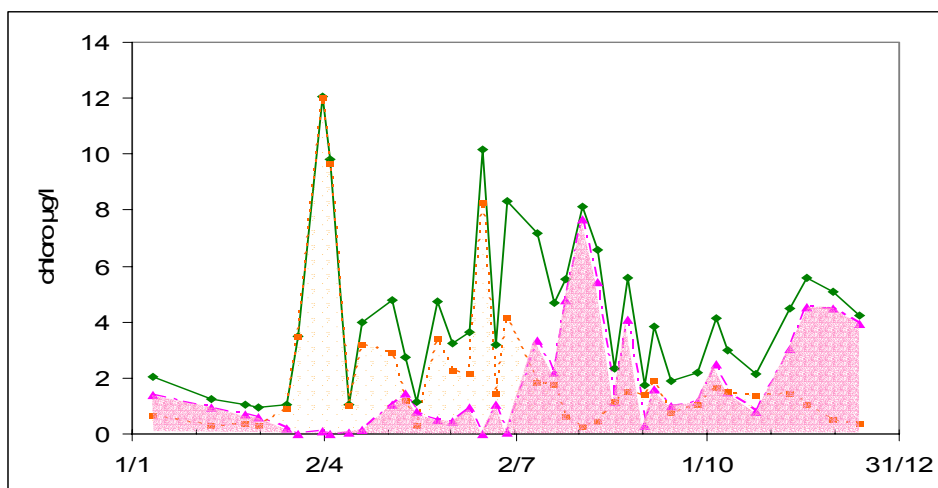
On retrouve les trois phases de production de biomasse :

- la première très courte en avril avec $12,06 \mu\text{g.l}^{-1}$ qui correspond au développement printanier des diatomées
- une deuxième en été présentant une succession de pics (maximum de $10,16 \mu\text{g.l}^{-1}$) succession de poussées planctoniques au mois de juin plutôt constituées d'algues "jaunes" (diatomées et dinophycées) et au mois d'août plutôt constituées d'algues "rouges" (cyanobactéries, cryptophytes)

- une troisième en automne correspondant en majorité à la croissance des cyanobactéries qui prennent de plus en plus d'importance relative au fur et à mesure que l'on avance dans l'année.

Vers la fin de l'année les concentrations en chlorophylle a diminuent lentement ($4 \mu\text{g.l}^{-1}$).

Figure 20 : Variation saisonnière des concentrations moyennes en Chlorophylle a ($\mu\text{g.l}^{-1}$) sur la couche trophogène au point B en 2005 (—◆— choro tot, - -■- - diatomées, —▲— cyanobactéries)



4.3.2. VARIATION INTERANNUELLE

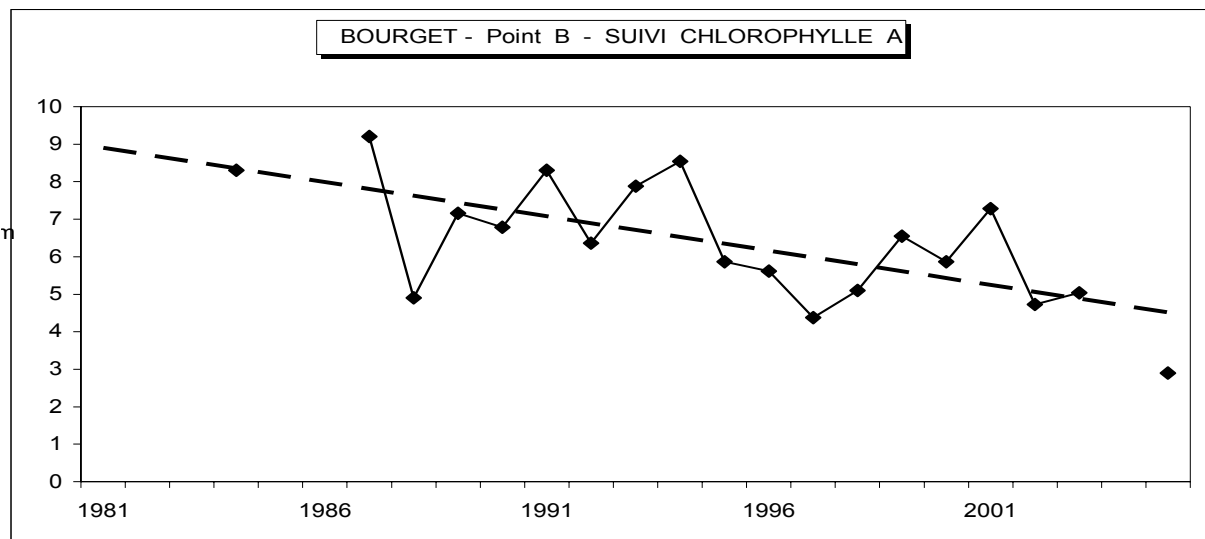
Tableau 14 : Evolution des concentrations maximales et moyennes annuelles ($\mu\text{g.l}^{-1}$) en chlorophylle a sur la couche trophogène au point B de 1987 à 2005.

Chloro a $\mu\text{g.l}^{-1}$	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
max							62,8	18,4	42,8	34,5	49,4	26,7	26,8	28
.Moyenne			8,3				9,2	4,9	7,16	6,78	8,3	6,36	7,88	8,54

Chloro a $\mu\text{g.l}^{-1}$	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
max	15,4	12,6	17,7	12,7	19,1	18,9	35,1	14	13,5	6,3	12,2
.Moyenne	5,86	5,62	4,37	5,1	6,55	5,86	7,28	4,73	5,04		2,9

Avec $2,9 \mu\text{g.l}^{-1}$ de concentration moyenne annuelle en chlorophylle a, l'année 2005 présente la valeur la plus faible calculée depuis 1987. La distribution interannuelle des concentrations moyennes de chlorophylle a reste assez hétérogène tout en permettant de dégager une tendance à la baisse qui traduit une évolution favorable de cet indice. En effet, les valeurs moyennes passent de $8 \mu\text{g.l}^{-1}$ en 1983 à environ $3 \mu\text{g.l}^{-1}$ en 2005 (fig.21).

Figure 21 : Evolution des concentrations moyennes annuelles en chlorophylle a ($\mu\text{g.l}^{-1}$) sur la couche trophogène au point B de 1981 à 2005.



4.4. CYANOBACTERIES

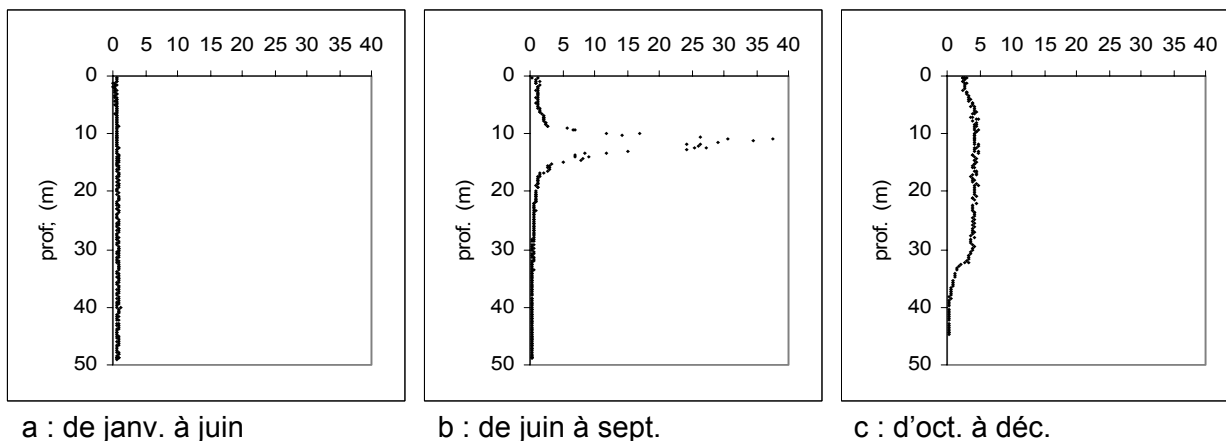
Nous rappelons que lors des épisodes de prolifération, les cyanobactéries posent de multiples problèmes liés notamment à leur capacité de synthétiser des toxines dangereuses pour les animaux mais aussi pour l'homme. Les proliférations de *P. rubescens* dans le lac du Bourget depuis 1998 ont motivé la mise en place d'un plan de surveillance (Humbert, 2001).

4.4.1. DYNAMIQUE DES POPULATIONS

Annexe 9

En utilisant les profils acquis avec la sonde fluorimétrique, nous pouvons apprécier la dynamique des cyanobactéries. Elle est caractérisée par la succession de trois phases distinctes illustrées par la figure 22 et se rapproche de ce que nous avons pu observer dans les années 1999, 2000, 2001, 2002 (Humbert et al. 2004, Jacquet et al. 2004).

Figure 22 : Exemple de distributions des concentrations en cyanobactéries ($\mu\text{g.l}^{-1}$ eq Chloro a) au point B au cours de l'année 2005.



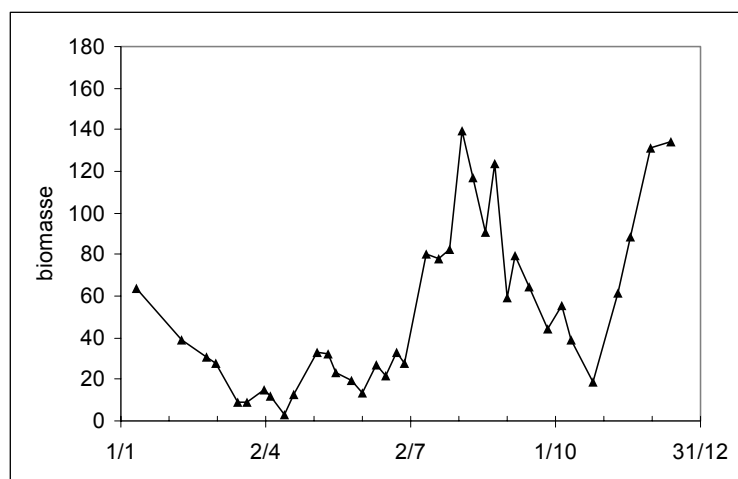
- De février à juin : les concentrations restent faibles autour de $1 \mu\text{g.l}^{-1}$ eq Chloro a et pratiquement homogènes sur la couche 0-30 m. (fig. 22 a)
- De juin à septembre : les cyanobactéries se concentrent dans la colonne d'eau au niveau du métalimnion grâce à leur aptitudes physiologiques (utilisation de faibles intensités lumineuses, utilisation du phosphore, capacité d'adapter leur flottabilité...). Les concentrations augmentent progressivement autour de 11 m de profondeur pour passer par un maximum le 03/08 avec près de $40 \mu\text{g.l}^{-1}$. (fig. 22 b)
- D'octobre à décembre : dans un premier temps, les cyanobactéries gagnent l'épilimnion, puis sont entraînées progressivement vers les couches profondes avec le refroidissement des eaux de surface et l'érosion de la thermocline. (fig. 22 c)

4.4.2. VARIATION SAISONNIERE

Pour apprécier les variations de la biomasse au cours de l'année 2005, chaque profil de sonde fluorimétrique est intégré sur une colonne d'eau 0-40 m (fig. 19) correspondant à la couche d'eau où se retrouvent les cyanobactéries pendant la majeure partie de l'année.

Cette intégration permet de quantifier les évolutions sur l'ensemble de la colonne d'eau et d'amortir les variations des profils dues à des déformations verticales de la colonne (Yon, 2004).

Figure 23 : Evolution de la biomasse en cyanobactéries (mg.m^{-2} eq Chloro a) au point B sur une colonne 0-40 m au cours de l'année 2005.



La figure 23 présente l'évolution de la biomasse au cours de l'année 2005.

Après une diminution de janvier à mars la distribution saisonnière présente deux pics de biomasse en août et en décembre. Ces deux maxima présentent des valeurs absolues identiques ($\approx 140 \text{ mg.m}^{-2}$) mais leur répartition verticale est différente :

- en août l'essentiel de la biomasse se situe entre 10 et 15 mètres de profondeur
- en décembre elle est également répartie sur une épaisseur de plus de trente mètres (fig.22).

Conséquences sur les pompages en eau potable :

Ces différences de répartition verticale de la biomasse des cyanobactéries ont des conséquences différentes sur les pompages d'eau potable.

En été, la présence d'une biomasse importante au niveau de la thermocline ne pose pas de problème puisque les stations de pompage puisent l'eau à 25 m, profondeur supérieure à celle où se trouvent les cyanobactéries.

En revanche, en décembre, le risque va devenir plus important car les cyanobactéries colonisent les milieux plus profonds. Elles se trouvent alors en quantité importante au niveau des points de pompage des stations d'alimentation en eau potable des communes d'Aix-Les-Bains et de Tresserve.

Pendant cette période critique, des contacts réguliers avec la DDASS et les gestionnaires des stations permettent de prévenir et d'éviter que les cyanobactéries ne posent un problème dans les réseaux de distribution.

4.5. LES INDICES OXYGENE

4.5.1. DISTRIBUTION VERTICALE

Les profils d'oxygène et de température de l'ensemble de la campagne 2005 sont reportés en annexes 10 et 11.

En 2005 la distribution verticale de l'oxygène reste de type clinograde au mois de janvier, bien que la réoxygénation du fond ait déjà commencé (10% de saturation le 13/12/2004 37% le 11/01/2005).

Un gradient en oxygène est observé à partir de 60 mètres de profondeur (de 80% à 60 m à 37% à 140 m). Le maintien d'un gradient thermique bien que faible (de 6,50 à 5,83 °C) reste suffisant pour ralentir l'homogénéisation complète des couches d'eau.

Par la suite, la réoxygénation progresse vers les couches profondes ; la distribution verticale devient orthograde en février avec une concentration en oxygène entre 9,36 et 9,50 mg.l⁻¹ le 8 février soit environ 75 % de la saturation. Le mélange apparaît alors complet.

Les températures basses se maintenant jusqu'au mois de mars, elles vont permettre une poursuite de l'oxygénation de l'ensemble de la masse d'eau.

Le 2/03 la température sur l'ensemble de la colonne d'eau se situe entre 5,23 et 5,17 et l'oxygène à 10,31 mg.l⁻¹ soit plus de 81 % de la saturation (*fig. 24 a*).

Dès le mois de mars et surtout début avril, l'élévation des températures de l'air et l'augmentation des durées d'insolation favorisent la mise en place d'un début de stratification thermique en surface et un démarrage de l'activité photosynthétique du phytoplancton. Production primaire qui démarrera réellement début avril avec des conséquences en surface sur la transparence, les concentrations en nutriments et les concentrations en oxygène (*fig. 6, 9, 16, 25*).

D'avril à septembre la distribution verticale de la température entraîne une stratification de l'oxygène présentant des concentrations différentes (*fig. 24 b*) :

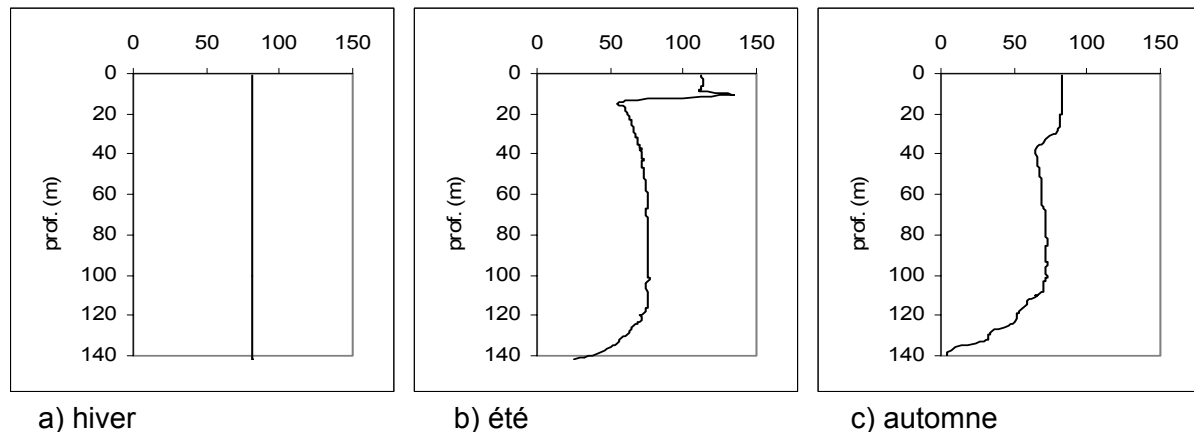
- Dans les couches superficielles (0 à 10 m) une sursaturation en oxygène apparaît, conséquence d'une activité photosynthétique active, cette sursaturation, d'abord présente en surface s'enfonce progressivement avec l'épaississement de l'épilimnion
- Autour d'une quinzaine de mètres de profondeur apparaît un minimum d'oxygène qui va s'accroître progressivement, atteindre une valeur minimale de 3,47 mg.l⁻¹ au mois de septembre et se maintenir jusqu'en décembre.
- de 50 à 110 m, la distribution verticale de l'oxygène est assez homogène autour de 75 % de la saturation.
- Bas de l'hypolimnion > à 120 m montre un déficit d'oxygène, les concentrations sont d'autant plus faibles que l'on se rapproche du fond.

Le refroidissement automnal entraîne un enfoncement de la thermocline. On observe alors une homogénéisation progressive de l'épilimnion dès la surface pour atteindre une trentaine de mètres d'épaisseur au mois de décembre avec pour conséquence (*fig. 24 c*) :

- la disparition du maximum d'oxygène (brassage et diminution de l'activité photosynthétique)
- la diminution du minimum d'oxygène métalimnique

Enfin, dans le bas de l'hypolimnion le déficit en oxygène s'aggrave et progresse depuis le fond.

Figure 24 : Distributions verticales des concentrations en oxygène (mg.l^{-1}) au point B en 2005.



4.5.2. VARIATION INTERANNUELLE

Remarque préalable:

Nous devons souligner l'influence prépondérante qu'exercent les facteurs externes, notamment les aléas climatiques, sur le calcul des indices de sursaturation épi et métalimnique et des sous saturations à 130 mètres. Les indices supérieurs sont influencés par les conditions d'ensoleillement et de températures favorables rencontrées au printemps et en été qui agissent directement sur la production primaire. Les indices des niveaux profonds quant à eux, dépendent de la qualité du brassage hivernal.

4.5.2.1. Indice de sursaturation moyenne

La sursaturation dans la couche trophogène est liée à l'activité photosynthétique des organismes phytoplanctoniques. Le calcul d'une sursaturation moyenne permet de suivre l'intensité du phénomène au cours du temps, une augmentation de l'indice constituant le signe d'une tendance à l'eutrophisation.

L'activité photosynthétique commence dès le début du mois d'avril; nous observons une augmentation de la concentration en oxygène et une sursaturation apparaît en surface le 1^{er} avril.

La sursaturation maximale en oxygène qui se situait plutôt autour de 2 m apparaît plus profondément dans le métalimnion (10 - 12 m) depuis 1998.

Plusieurs causes probables: amélioration de la transparence, modification des abondances relatives des espèces du phytoplancton (ex: cyanobactéries).

Si la différence des indices de sursaturation moyenne en oxygène entre les profondeurs de 2 m et celle du maximum d'oxygène (10 - 12 m) reste peu importante jusqu'en 2000, elle semble augmenter en 2001 et 2003 puis revenir à des valeurs relativement faibles.

Toutefois, nous préférons suivre ce dernier niveau que nous pensons plus représentatif des conséquences de l'activité photosynthétique que nous souhaitons mettre en évidence.

Au niveau du métalimnion

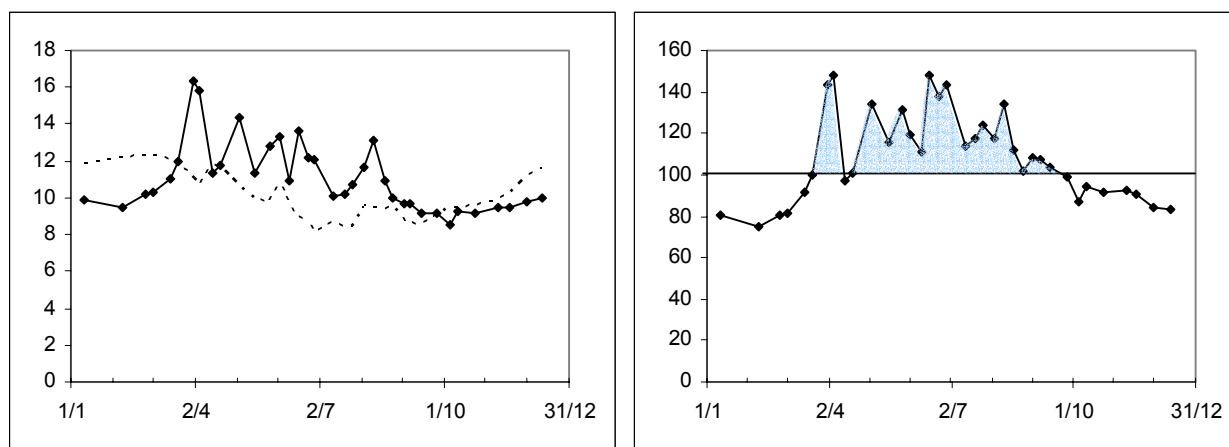
× Variation saisonnière

La variation saisonnière en oxygène montre deux périodes de production distinctes comme pendant l'année 2003 (fig. 25) :

- la première assez courte, présente un maximum le 05/04 avec **15,83 mg.l⁻¹** soit 148 % de saturation
- la seconde plus étalée dans le temps, de mai à août avec des concentrations variant entre 10 et 14 mg.l⁻¹ soit entre 110 et 147 % de la saturation.

A partir du mois de septembre les concentrations en oxygène diminuent progressivement jusqu'à la fin de l'année (fig. 25 b).

Figure 25 : Variation saisonnière des concentrations en oxygène au niveau du métalimnion au point B en 2005.



a) mesures (—◆—), saturations (- - - -) (mg.l⁻¹)

b) % de la saturation

× Variation annuelle

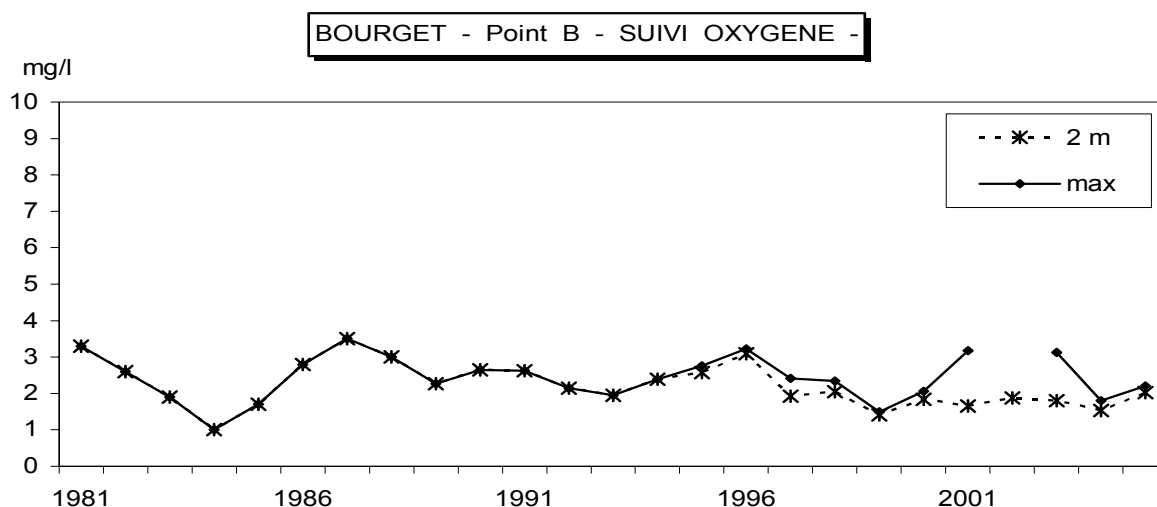
La sursaturation en oxygène à 2 m en 2005 s'élève à **2,02 mg.l⁻¹** et montre une certaine stabilité depuis 1999 (fig. 26).

Au niveau des concentrations maximales en oxygène, l'indice de sursaturation reste assez comparable à celui mesuré à 2 m de profondeur jusqu'en 2000 et s'en écarte à partir de 2001. Les valeurs passent alors respectivement à **3,18 et 3,13 mg.l⁻¹** en 2001 et 2003 ; en 2004 et en 2005 les valeurs retrouvent un niveau comparable à celui de l'année 2000 autour de **2 mg.l⁻¹**.

Le sens général d'évolution de cet indice depuis 1981 n'est pas fondamentalement modifié et reste relativement constant autour d'une valeur de **2,4 mg.l⁻¹**.

Tableau 15 : Evolution des sursaturations en oxygène (mg.l^{-1}) à 2 m et maximales au point B de 1981 à 2005.

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
max	3,3	2,6	1,9	1	1,7	2,8	3,5	3	2,27	2,65	2,62	2,15	1,95	2,39
.2 m	3,3	2,6	1,9	1	1,7	2,8	3,5	3	2,27	2,65	2,62	2,15	1,95	2,39
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005			
.max	2,76	3,22	2,42	2,34	1,49	2,06	3,18		3,13	1,80	2,21			
.2 m	2,57	3,09	1,92	2,05	1,41	1,84	1,65	1,88	1,80	1,53	2,02			

Figure 26 : Evolution des indices moyens annuels de sursaturation en oxygène (mg.l^{-1}) à 2 m et maxi au point B de 1981 à 2005.

4.5.2.2. Indices de sous saturation moyenne

En raison des effets cumulés de la minéralisation de la matière organique et des difficultés d'échanges des éléments dissous dus à la stratification thermique, nous observons des sous saturations en oxygène dans les couches plus profondes.

Dans la partie basse du métalimnion

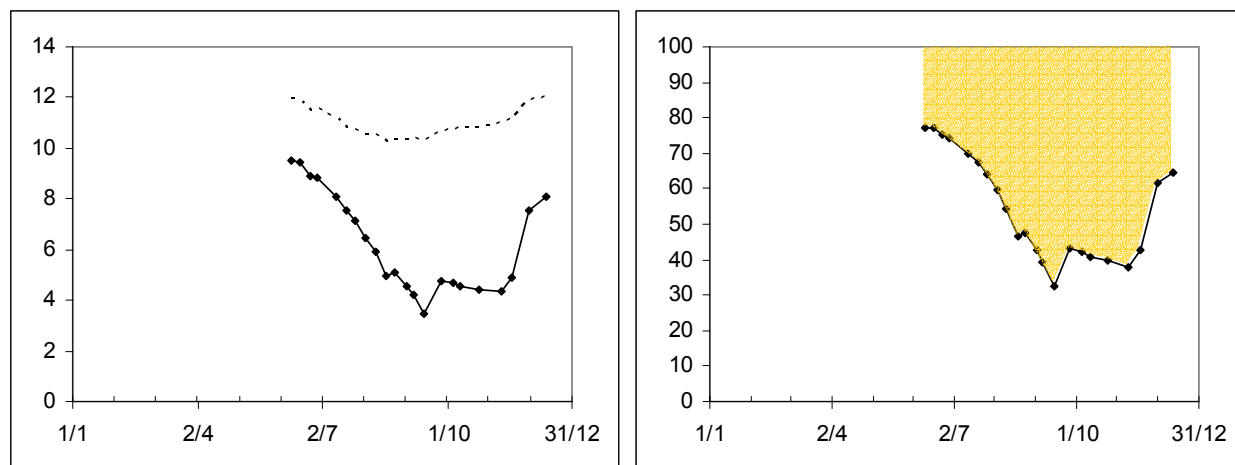
× Variation saisonnière (fig. 27)

On observe une sous saturation en oxygène entre 13 et 20 mètres de profondeur jusqu'au début du mois de novembre puis le minimum s'enfonce avec l'érosion de la thermocline jusqu'à une trentaine de mètres en décembre.

En 2005, cette sous saturation commence dans la deuxième moitié du mois de juin, passe par un minimum le 14 septembre avec une valeur de **3,47 mg.l^{-1}** .

Le minimum d'oxygène métalimnique diminue progressivement jusqu'au mois de décembre à la suite du refroidissement automnal qui entraîne une homogénéisation de l'épilimnion sur plus de 20 m d'épaisseur (érosion de la thermocline).

Figure 27 : Variation saisonnière des mesures et des saturations en oxygène (mg.l^{-1}) entre 15 et 35 m au point B en 2005.



a) mesures (—◆—), saturations (- - - -) (mg.l^{-1}) b) % de la saturation

× variation annuelle (fig. 28)

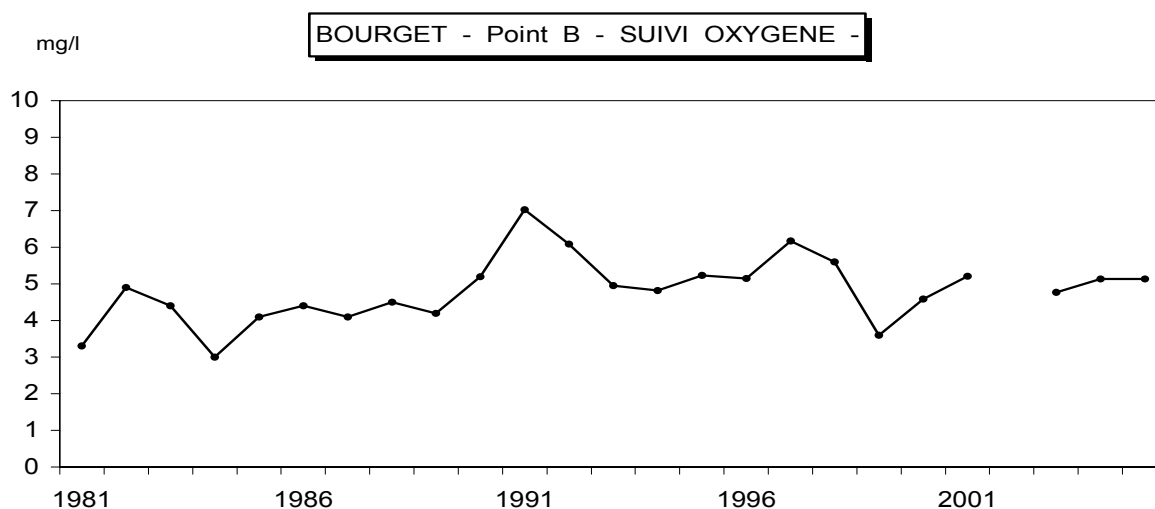
En 2005 la sous saturation moyenne annuelle en oxygène se monte à **5,13 mg.l^{-1}** . Si l'on a pu observer une augmentation de ce paramètre entre 1981 et 1992 (de 3,3 à 6 mg.l^{-1}), il semble présenter, depuis 1993, une certaine stabilité autour d'une valeur moyenne de **5 mg.l^{-1}** .

Tableau 16 : Evolution de la sous saturation en oxygène (mg.l^{-1}) au métalimnion au point B de 1981 à 2005.

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Moyenne	3,3	4,9	4,4	3,0	4,1	4,4	4,1	4,5	4,2	5,19	7,03	6,08	4,95	4,82

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Moyenne	5,23	5,15	6,17	5,6	3,6	4,59	5,21		4,77	5,13	5,13

Figure 28 : Evolution des indices moyens annuels de sous saturation en oxygène (mg.l^{-1}) entre 15 et 35 m au point B de 1981 à 2005.



En profondeur

L'intensité de la minéralisation de la matière organique et la qualité de la réoxygénation hivernale peuvent s'estimer à partir de l'analyse des variations saisonnières des valeurs en oxygène dans les zones profondes.

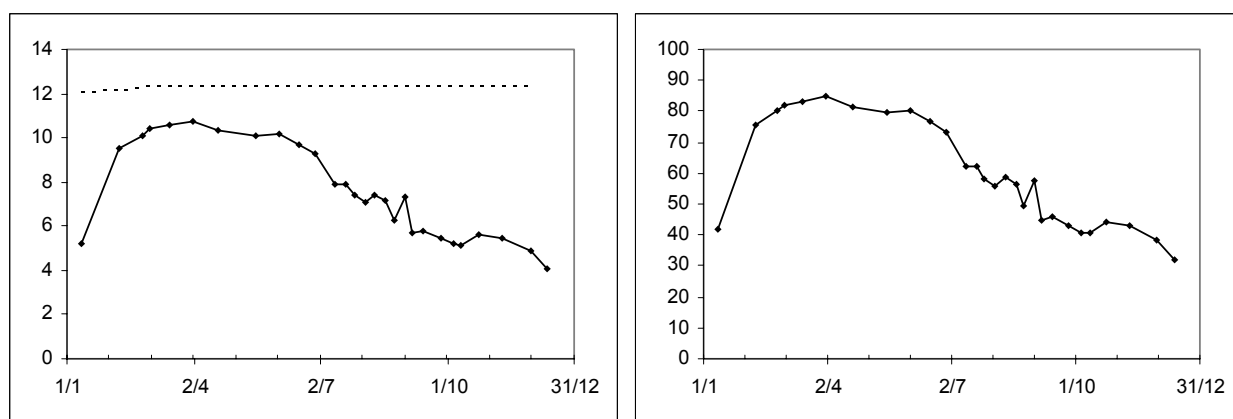
A 130 mètres :

× Variation saisonnière (fig. 29)

La réoxygénation des couches profondes est totale en 2005. Le maximum est atteint au mois d'avril avec **10,77 mg.l⁻¹** le 01/04 correspondant à plus de **84 %** de la saturation. La phase de circulation des eaux ayant été suffisamment intense, l'homogénéisation de toute la colonne d'eau est donc observée au début de l'année comme en 2004. La période hivernale 2005 étant légèrement plus froide et plus longue que l'année précédente (§ 2.1) permet une réoxygénation un peu plus intense.

Après la mise en place de la stratification thermique et donc l'isolement de l'hypolimnion, les concentrations en oxygène diminuent progressivement jusqu'en novembre (**4,06 mg.l⁻¹**), elles traduisent les processus de minéralisation.

Figure 29 : Variation saisonnière des mesures et des saturations en oxygène (mg.l⁻¹) à 130 m au point B en 2005.



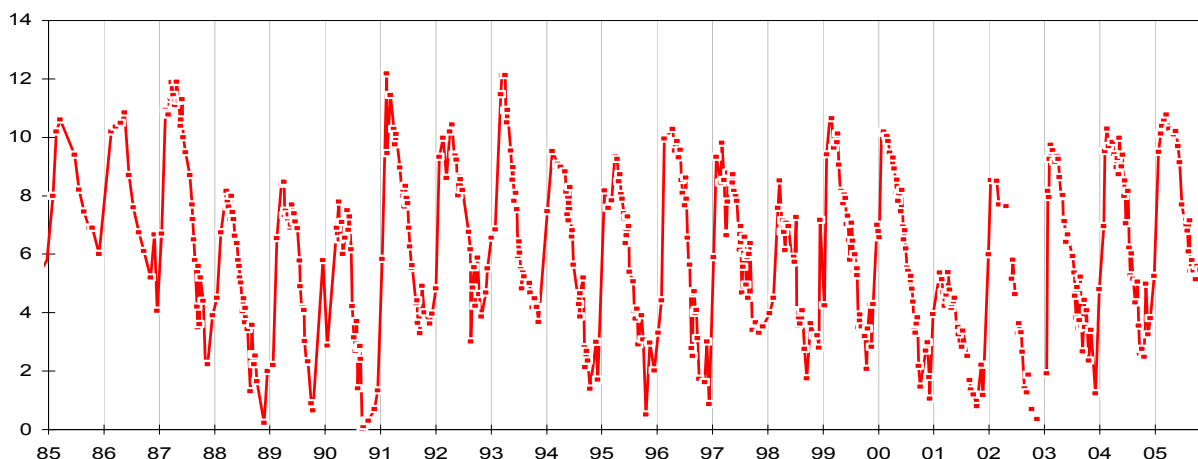
a) mesures (—◆—), saturations (- - -) (mg.l⁻¹) b) % de la saturation

× variation annuelle (fig. 30)

De 1985 à 2005, le suivi des concentrations en oxygène à 130 mètres permet de visualiser
la variabilité des réoxygénations hivernales
la relation entre leur intensité et les teneurs mesurées en fin de stratification thermique.

On notera que l'année 2005 présente une réoxygénation assez satisfaisante par rapport aux années précédentes ; en effet, depuis 2001 c'est la quatrième année successive qui montre une augmentation de la réoxygénation hivernale. Dans la chronique des valeurs depuis 1985, elle se situe à des niveaux comparables aux années 1996, 1999.

Figure 30 : Evolution des teneurs en oxygène en mg.l^{-1} de saturation à 130 mètres au point B de 1985 à 2005.



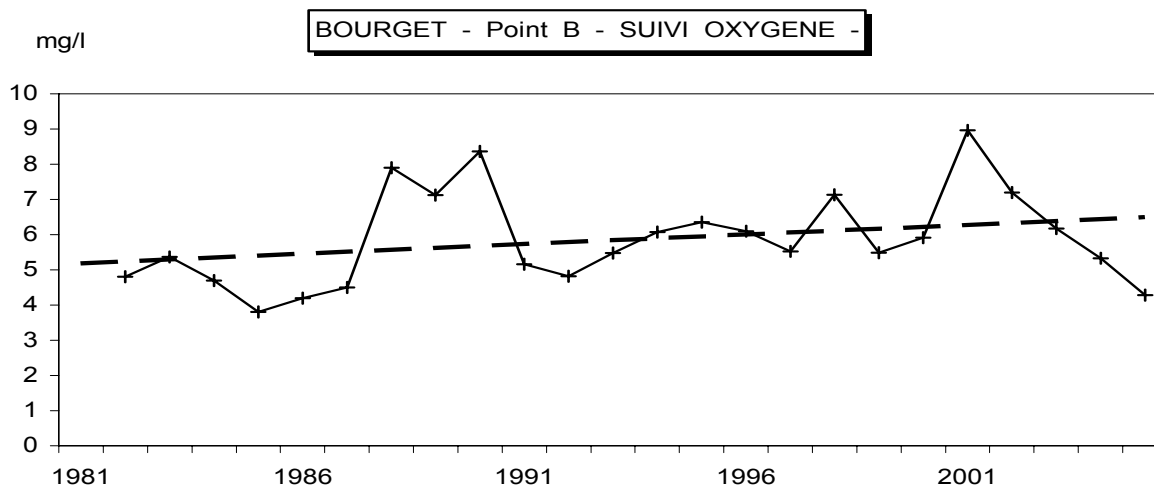
Sous saturation moyenne à 130 mètres (fig. 31)

Les niveaux de sous saturation du fond dépendent de l'intensité de la minéralisation et donc des quantités de matière organique à dégrader. Une augmentation régulière de l'indice constitue un signe d'eutrophisation, cependant il convient d'être très prudent quant à l'analyse de ce paramètre, la sous saturation moyenne est d'autant plus importante que la réoxygénation hivernale est mauvaise.

Tableau 17 : Sous saturations moyennes annuelles en oxygène à 130 mètres (mg.l^{-1}) au point B, de 1981 à 2005.

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Moyenne		4,80	5,37	4,70	3,80	4,20	4,50	7,90	7,12	8,36	5,16	4,82	5,48	6,07
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005			
Moyenne	6,35	6,10	5,52	7,14	5,49	5,92	8,96	7,20	6,17	5,33	4,28			

Figure 31: Evolution de l'indice de sous saturation moyen annuel en oxygène (mg.l^{-1}) à 130 mètres au point B de 1981 à 2005.



L'indice de l'année 2005 est légèrement inférieur à celui des deux années précédentes mais reste cohérent avec le sens d'évolution déjà constaté avec les données antérieures. D'une manière globale, le sens d'évolution semble dénoter une légère dégradation de la qualité des eaux à travers cet indice puisque les valeurs de ce paramètre tendent à augmenter (de 5 à 7 mg.l⁻¹).

La sous saturation moyenne en oxygène à 130 mètres de profondeur présente la valeur la plus faible depuis près de vingt ans. L'évolution de cet indice semble gouvernée plus par l'intensité de la réoxygénation hivernale que par l'intensité de la minéralisation de la matière organique dans la zone profonde. On remarque dans cette chronique que les niveaux de sous saturation les plus élevés correspondent aux années caractérisées par une mauvaise réoxygénation de la zone de fond (1988, 1989, 1990 et 2001).

4.5.2.3. Déficits et consommations hypolimniques

Dans le cadre du suivi, on considère que les consommations en oxygène sont d'autant plus élevées que la minéralisation est importante. Ces indices permettent en partie de s'affranchir de la qualité de la réoxygénation hivernale qui influence le calcul de la sous saturation moyenne en oxygène à 130 mètres.

Tableau 18 : Oxygène hypolimnique au point B en 2005 et en 2004 – déficits et consommations

		2005	2004
Déficit à l'origine	mg.l ⁻¹	0,81	1,92
Déficit maximum	mg.l ⁻¹	4,54	5,29
Consommation hypolimnique annuelle	mg.l ⁻¹	3,73	3,37
Consommation hypolimnique journalière	mg.m ⁻³ .j ⁻¹	13,71	14,22

Les déficits en oxygène calculés en début et en fin de stratification thermique sont légèrement inférieurs aux valeurs de 2001 et de 2003 en relation avec la réoxygénation hivernale plus efficace en 2005 ; cependant, ils restent globalement dans le même ordre de grandeur que les années précédentes.

Les consommations hypolimniques globales et journalières sont respectivement de **3,73 mg.l⁻¹** et **13,71 mg.m⁻³.j⁻¹** comparables aux données de la chronique 1984 – 2005.

Les distributions des indices des consommations en oxygène annuelles et journalières depuis 1984 ne permettent pas de dégager de tendance générale ; ces valeurs fluctuent autour de données relativement constantes respectivement de 4 mg.l⁻¹ et de 17 mg.m⁻³.j⁻¹ et demeurent à des niveaux qui peuvent être considérés comme modérés.

L'évolution des consommations en oxygène dans l'hypolimnion n'indique pas de dégradation du niveau trophique (*fig. 32, 33*).

Figure 32 : Oxygène hypolimnique - Evolution de la consommation annuelle au point B de 1984 à 2005 (mg.l⁻¹).

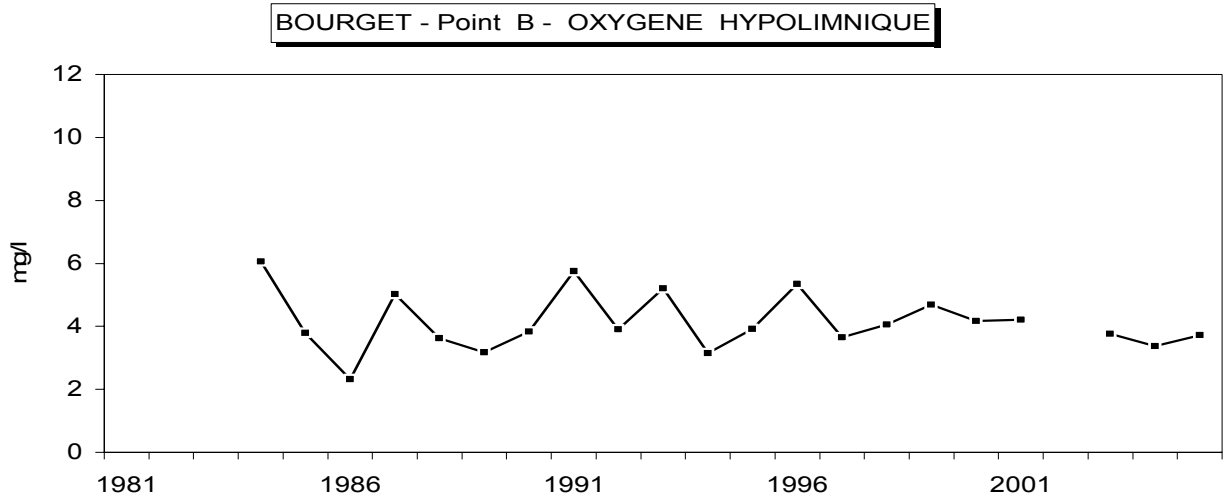
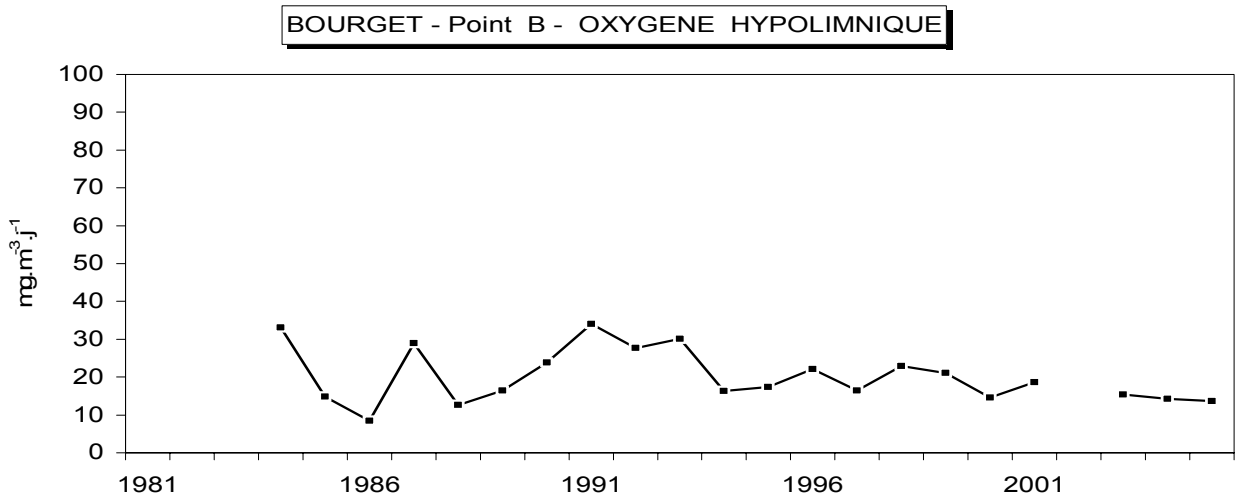


Figure 33 : Oxygène hypolimnique - Evolution de la consommation journalière au point B de 1984 à 2005 (mg.m³.j⁻¹)



CONCLUSION

Le suivi allégé joue pleinement son rôle d'outil de gestion en définissant la tendance générale de l'évolution trophique du lac du Bourget.

Il vient, cette année encore, en association à d'autres études plus fondamentales dont les objectifs sont de comprendre plus précisément le fonctionnement du lac :

- Suivi lourd du lac du Bourget lancé en 2004 – 2005 par le CISALB et réalisé par l'INRA de Thonon les Bains
- Programme de recherche : DYLACHEM avec la participation d'une dizaine de laboratoires de recherche.

LES NUTRIMENTS

Après une diminution des concentrations moyennes hivernales en nutriments jusque dans les années 90, le suivi montre une relative stabilité de ces paramètres autour de **0,62 mg.l⁻¹ N** pour les nitrates et autour de **0,024 mg.l⁻¹ P** pour les phosphates.

Par rapport à 2004, la légère diminution des concentrations en nitrates (-10%) ne remet pas en cause pour l'instant le sens général d'évolution. Les moyennes hivernales retrouvent les valeurs de 1996 sans atteindre celles de 1999 à 2003 (< 0,60 mg.l⁻¹),

Globalement, les réductions des concentrations moyennes entre 1981 et 2005 s'établissent autour de 25 % (de **0,82 à 0,62 mg.l⁻¹ N**) pour les nitrates et de 80 % (de **120 à 24 µg.l⁻¹ P**) pour les phosphates.

Sur la base des modèles OCDE d'évaluation de la catégorie trophique, ces valeurs confèrent au lac du Bourget un niveau **mésotrophe-eutrophe**.

LA TRANSPARENCE

Paramètre gouverné par l'abondance phytoplanctonique, la transparence estivale pour l'année 2005 avec **4,75 mètres** (valeur la plus faible depuis l'année 2000) s'inscrit, toutefois, normalement dans le sens général d'une évolution favorable perçue les années précédentes (**3,0 à 5,50 m** de 1981 à 2005).

LA CHLOROPHYLLE A

L'eutrophisation entraîne une modification qualitative et quantitative du phytoplancton. L'analyse de l'évolution de la chlorophylle permet d'approcher les changements quantitatifs.

Pour l'année 2005, l'indice chlorophylle du lac du Bourget, ne montre aucune dégradation du niveau trophique, il diminue, au contraire, légèrement depuis 1983 (de **8,3 µg.l⁻¹** en 1983 à **3 µg.l⁻¹** en 2005).

Il faut, cependant, rester prudent dans l'interprétation du sens d'évolution de ce descripteur ; la valeur de cet indice semble être légèrement sous estimée.

En effet, les prélèvements intégrés (cf. protocole) réalisés sur une couche d'eau d'épaisseur égale à 2,5 fois la profondeur de disparition du disque de Secchi ne prennent pas en compte l'ensemble de la biomasse algale à certaines périodes de l'année (données fluorimétriques).

En 2006, les prélèvements s'effectueront systématiquement sur une épaisseur de 20 mètres.

LES INDICES OXYGENE

Les indices des sursaturations épilimniques et des sous saturations hypolimniques sont influencés par les facteurs externes, notamment les aléas climatiques (ensoleillement, température ...) ou par l'importance de la réoxygénation hivernale des couches profondes.

Si les indices de sursaturation dans les couches supérieures n'évoluent pas de façon significative, ils fluctuent autour de valeurs constantes **2,5 mg.l⁻¹**, il n'en est pas de même pour les indices de sous saturation dans les couches profondes qui montrent une légère dégradation :

de **3 à 5 mg.l⁻¹** dans le métalimnion

de **5 à 6 mg.l⁻¹** à 130 m de profondeur

Les consommations en oxygène annuelle et journalière dans l'hypolimnion évoluent autour de valeurs à peu près constantes, respectivement de **4 mg.l⁻¹** et de **17 mg.m⁻³.j⁻¹** et demeurent à des niveaux qui peuvent être considérés comme modérés si l'on s'appuie sur la méthode de diagnose rapide développée par le CEMAGREF.

L'analyse de l'ensemble des données permet d'être optimiste quant à l'évolution actuelle de la qualité des eaux du lac, évolution que l'on peut juger comme globalement satisfaisante.

Si différents paramètres retenus pour le suivi indiquent une légère amélioration du niveau trophique à travers leur sens d'évolution depuis 1980, date de la mise en service des premiers grands travaux de restauration accomplis dans le bassin versant du lac, il faut noter une certaine stabilisation de ces descripteurs depuis une dizaine d'années (nitrates, phosphates, transparence).

Les différents travaux actuellement réalisés (assainissements domestiques, limitation des pollutions agricoles, limitation et maîtrise des pollutions industrielles et routières...) dans le cadre du contrat de bassin versant ne peuvent que contribuer à poursuivre l'amélioration du niveau trophique du lac du Bourget.

BIBLIOGRAPHIE

- BARROIN G., 2004 ; Phosphore, azote, carbone... Du facteur limitant au facteur de maîtrise ; Le courrier de l'environnement de l'INRA n°52 ; 25 p.
- CEMAGREF ; 1981 ; Lac du Bourget -- Propositions pour un suivi allégé d'évolution ; 41 p. ; DQEPP, Lyon.
- CEMAGREF ; 1986 ; Suivi allégé de l'état trophique d'un lac, Informations techniques du CEMAGREF, 63(7), 6 p. Lyon.;
- CT LAC DU BOURGET ; 1993 ; Suivi de la qualité des eaux du Lac du Bourget - Bilan de 10 années (1981 - 1990). 21 p.; D.D.A.F., S.I.L.B. ; Aix-les-Bains.
- CT LAC DU BOURGET ; 2005 ; Lac du Bourget ; Suivi Allégé 2004 ; 40 p. + annexes, CISALB
- GRETI ; 1998 ; Analyse de l'évolution de la qualité des eaux du lac du Bourget ; 1995-96 ; Rapport + Annexes, 346 p.; Université de Savoie (GRETI), CERGRENE, INRA Thonon, CT lac du Bourget.
- CISALB ; 2002 ; Contrat de Bassin Versant du Lac du Bourget ; Rapport - Projet soumis à concertation ; 106 p.
- HUMBERT JF. ; 2001 ; Mise en place d'un protocole de surveillance des cyanobactéries dans le lac du Bourget - rapport d'étude ; 35 p.; CISALB ; Contrat de bassin versant du lac du Bourget ; Etudes préliminaires.
- HUMBERT JF. et al.; 2004; Proliférations d'une cyanobactérie toxique dans un écosystème en voie de restauration : le paradoxe du lac du Bourget ; 11 p.; CARRTEL
- JACQUET, S. et al. 2004. The proliferation of the toxic cyanobacterium *Planktothrix rubescens* following restoration of the largest natural French lake (Lac du Bourget). Harmful Algae
- LEMAITRE A. ; 2001 ; Etude de la qualité des eaux du lac du Bourget : Suivi allégé 1999 - 2000 et analyse de l'évolution trophique. 47 p.; Maîtrise des Biologie des populations et des Ecosystèmes ; Université Joseph Fournier, Grenoble.
- YON V, ; 2004 ; Mesure en continu de l'oxygène dissous dans le lac du Bourget (Savoie), relation avec la production phytoplanctonique ; DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives. Laboratoire de Géochimie des eaux, Paris VII, IPGP ; 70 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Evolution des températures de l'air, de la pluviométrie et de la durée d'insolation à la station météorologique de Voglans de 1974 à 2005.

Annexe 2 : Tableaux des concentrations en nutriments à différentes profondeurs en 2005.

Annexe 3 : Graphiques des profils des concentrations en Ptot (mg.l^{-1}) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 4 : Graphiques des profils des concentrations en PO4 ($\text{mg.l}^{-1}\text{P}$) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 5 : Graphiques des profils des concentrations en NO3 ($\text{mg.l}^{-1}\text{N}$) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 6 : Graphiques des profils des concentrations en SiO2 (mg.l^{-1}) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 7 : Graphiques des profils des concentrations en COT (mg.l^{-1}) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 8 : Graphiques des profils fluorimétriques de chlorophylle totale ($\mu\text{g.l}^{-1}\text{chloro a}$) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 9 : Graphiques des profils fluorimétriques de Cyanobactéries ($\mu\text{g.l}^{-1}\text{chloro a}$) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 10 : Graphiques des profils des températures ($^{\circ}\text{C}$) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 11 : Graphiques des profils d'oxygène en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 12 : Graphiques des profils de pH en 2005 - Lac du Bourget - Point B.

Annexe 13 : Graphiques des profils de conductivité ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) en 2005 - Lac du Bourget - Point B.