

ÉVOLUTION DU PHYTOPLANCTON DU PETIT LAC (LÉMAN)

CHANGES IN THE PHYTOPLANKTON OF PETIT LAC (LAKE GENEVA)

Campagnes 2066 à 2010

PAR

Sophie LAVIGNE et Arielle CORDONIER

SERVICE DE L'ÉCOLOGIE DE L'EAU, DÉPARTEMENT DU TERRITOIRE, DE L'INTÉRIEUR ET DE LA MOBILITÉ,
CP 78, CH - 1211 GENÈVE 8

Jean-Michel JAQUET

UNEP DEWA GRID - Europe, Chemin des Anémones 11, CH - 1219 GENÈVE

RÉSUMÉ

Ce rapport présente les résultats de l'étude du phytoplancton et de la chlorophylle a du Petit Lac (Léman - station GE 3) pour les années 2006 à 2010.

Dans le Petit Lac, les biomasses annuelles ont fortement fluctué entre 2006 et 2010. Le profil des concentrations de chlorophylle a fluctuent de manière semblable.

Le microplancton reste largement dominant.

Pour l'ensemble de la période quinquennale, les groupes pigmentaires sont dominés par les conjuguées (Zygothycées) et les diatomées avec respectivement 33 et 24% de la biomasse totale. Les cyanobactéries n'ont entraîné aucun problème de toxicité pour la période 2006-2010.

L'indice de diversité des espèces présente des variations interannuelles très marquées.

Cyclotella bodanica var. lemanensis, espèce indicatrice de conditions oligotrophes, qui figurait déjà parmi les espèces dominantes en 2004 et 2005, demeure toujours bien présente au cours de cette dernière période quinquennale. En effet, elle compte parmi les espèces "très dominantes" en 2008 et 2010.

L'analyse des cycles saisonniers montre une année atypique en 2006 avec de fortes biomasses en période hivernale, attribuables à l'espèce filamenteuse Mougeotia gracillima.

En août 2007, une biomasse particulièrement élevée ($32'445 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) de cette même espèce a été mesurée dans le Petit Lac.

L'objectif d'une biomasse estivale moyenne inférieure à $1'500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ qui constitue la limite d'un risque de nuisances, a été dépassé en 2007, 2008, 2009 mais pratiquement pas en 2010. On note également des valeurs de biomasses très élevées en période automnale.

Excepté en 2006 où une valeur de $21 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ est observée, les concentrations moyennes en phosphore total calculées sur l'ensemble de la colonne d'eau (0-70m) sont inférieures à $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ (objectif fixé par la CIPEL). Paradoxalement, les biomasses algales restent très élevées; en 2007, la plus forte valeur annuelle a été observée depuis le début du suivi du phytoplancton dans le Petit Lac en 1977.

ABSTRACT

This report presents the findings of the study of the phytoplankton and of chlorophyll a in Petit Lac (Lake Geneva - GE 3) for the years 2006 to 2010.

In Petit Lac, the annual biomasses fluctuated markedly between 2006 and 2010. The profile of the concentrations of chlorophyll a fluctuated in a similar manner.

The microplankton remained markedly dominant.

Throughout the entire five year period, the pigmented groups were dominated by the conjugates (Zygothycées) and the diatoms, which accounted for 33 and 24% of the total biomass respectively. The cyanobacteria did not lead to any toxicity problem during the period 2006-2010.

The species diversity index displayed very marked interannual variations.

Cyclotella bodanica var. *lemanensis*, a species indicative of oligotrophic conditions that was already one of the dominant species in 2004 and 2005, was still present during this subsequent five-year period, and was indeed one of the "very dominant" species in 2008 and 2010.

Analysis of the seasonal cycles showed that 2006 was an atypical year, with high biomasses during the winter period, attributable to the filamentary species *Mougeotia gracillima*.

In August 2007, a particularly high biomass ($32'445 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) of this same species was measured in Petit Lac.

The target of a mean summer biomass of less than $1'500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, which is the threshold for a risk of problems, was exceeded in 2007, 2008, and 2009, but hardly at all in 2010. There were also very high biomass values during the Autumn/Fall period.

With the exception of 2006, when a value of $21 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ was observed, the mean concentrations of total phosphorus calculated for the entire water column (0-70m) were below $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ (the target set by CIPEL). Paradoxically, algal biomasses remained very high; in 2007, the annual value was the highest recorded since phytoplankton monitoring was started in Petit Lac in 1977.

1. INTRODUCTION

Comme dans le Grand Lac, l'étude du phytoplancton du Petit Lac se poursuit depuis plusieurs décennies, plus particulièrement par l'analyse d'échantillons d'eau brute intégrés et la mesure de la chlorophylle *a* sur la colonne d'eau 0-10 m entre 1977 et 1999, et 0-20 m depuis 2000.

Les résultats antérieurs ont fait l'objet de plusieurs rapports, notamment REVACLIER (1996) pour la période 1986 - 1995, REVACLIER (2001) pour l'évolution de 1996 à 2000, LAVIGNE (2005) pour les années 1993 à 2003. Enfin, une étude plus globale intitulée : "Etat écologique du Petit Lac en 2008" a été publiée par le Service de l'écologie de l'eau de l'Etat de Genève en 2010 (SERVICE DE L'ÉCOLOGIE DE L'EAU, 2010).

Les résultats de l'étude du phytoplancton et de la chlorophylle *a* dans le Petit Lac (station GE3) pour la période 2006 à 2010 sont présentés ci-dessous.

2. MÉTHODES

Le phytoplancton est prélevé mensuellement au large d'Hermance (Station GE3), au-dessus de la fosse de Chevrens, de 71 m de profondeur. Les échantillons sont récoltés dans la couche 0-20 m (peut varier de +/- 2m selon les conditions météorologiques) à l'aide d'une cloche intégratrice d'eau brute (PELLETIER et ORAND, 1978).

L'examen qualitatif et quantitatif est effectué au microscope inversé, après fixation au Lugol et concentration des organismes par sédimentation en chambre d'UTERMÖHL pendant 24 heures. Le volume sédimenté est de 50 mL, ou le cas échéant un volume supérieur (100 mL) ou inférieur (10 mL) selon que l'abondance est trop faible ou trop importante.

La biomasse est calculée par addition des biovolumes cellulaires et exprimée en poids de matière fraîche par mètre cube d'eau (UTERMÖHL, 1958). Le biovolume unitaire (cellule, colonie ou filament de 100 mL) varie en fonction de la morphologie des algues. Les biovolumes utilisés (DRUART et RIMET, 2008) sont les mêmes que ceux utilisés pour l'étude du Grand Lac.

Les classes de tailles du phytoplancton sont basées sur la description de WETZEL et LICKENS (2000), soit :

- Microplancton : longueur de la cellule ou de la colonie > 20 μm et le volume > $10'000 \mu\text{m}^3$.
- Nanoplancton : longueur de la cellule ou de la colonie < 20 μm et le volume < $10'000 \mu\text{m}^3$.

La concentration en chlorophylle *a* est mesurée au spectrophotomètre après filtration des échantillons d'eau brute (sur filtre en nitrate de cellulose, 0.6 μm de porosité) et extraction des pigments cellulaires dans un mélange hydro-acétone (10/90) selon la méthode décrite par STRICKLAND et PARSONS (1968).

En plus des dosages en laboratoire, le Service de l'écologie de l'eau effectue un profil de la chlorophylle *a*, de la surface jusqu'au fond, à l'aide d'une sonde multiparamétrique FLNTUB (Firme WetLabs).

La transparence est mesurée avec un disque de Secchi blanc de 30 cm de diamètre.

Les échantillons d'eau pour les analyses physico-chimiques sont prélevés à 0 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 30 ; 50 et 70 m de profondeur.

3. RÉSULTATS

Les données brutes concernant le phytoplancton et la chlorophylle *a* du Petit Lac peuvent être obtenues auprès des auteurs.

Une période météorologique défavorable couplée à une panne de bateau, a entraîné l'annulation de la campagne de février 2010.

3.1 Transparence

Pour la période étudiée, la transparence de l'eau du Petit Lac (figure 1) évolue de manière classique avec des valeurs plus élevées en période hivernale et en période des eaux claires.

De 2006 à 2010, la période des eaux claires est observée en mai ou juin, sauf en 2007 où on l'observe en avril.

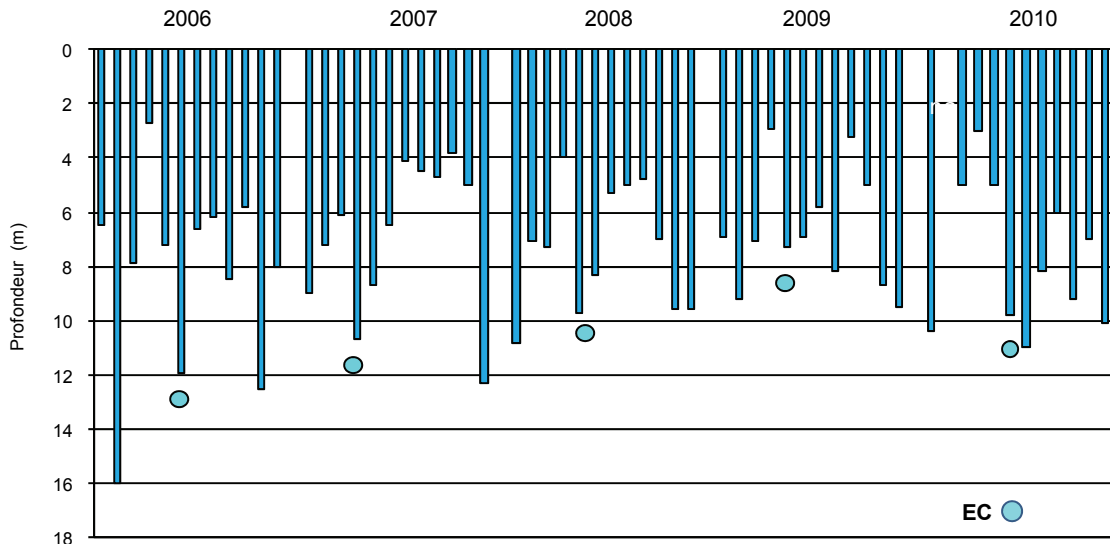


Figure 1 : Transparence mesurée avec le disque de Secchi à la station GE3 de 2006 à 2010. EC = Eaux Claires.

Figure 1 : Secchi disk transparency measured at GE3 station from 2006 to 2010 – (CW/EC) Clear water.

3.2 Profondeur de la zone euphotique

L'épaisseur de la zone euphotique, arbitrairement estimée dans le Léman à l'aide de la formule :

$$Z_{eu,s} = 2.7 \cdot Z_s \text{ (POURRIOT et MEYBECK, 1995),}$$

a également été calculée sur la base de mesures optiques de l'éclairage descendant ($Z_{eu,k}$; Annexe 2). La figure 2 montre qu'estimation et mesures ne donnent pas les mêmes résultats : $Z_{eu,s}$ basé sur la profondeur Secchi tantôt sur-estime, tantôt sous-estime la vraie valeur $Z_{eu,k}$, les différences pouvant atteindre 5 mètres.

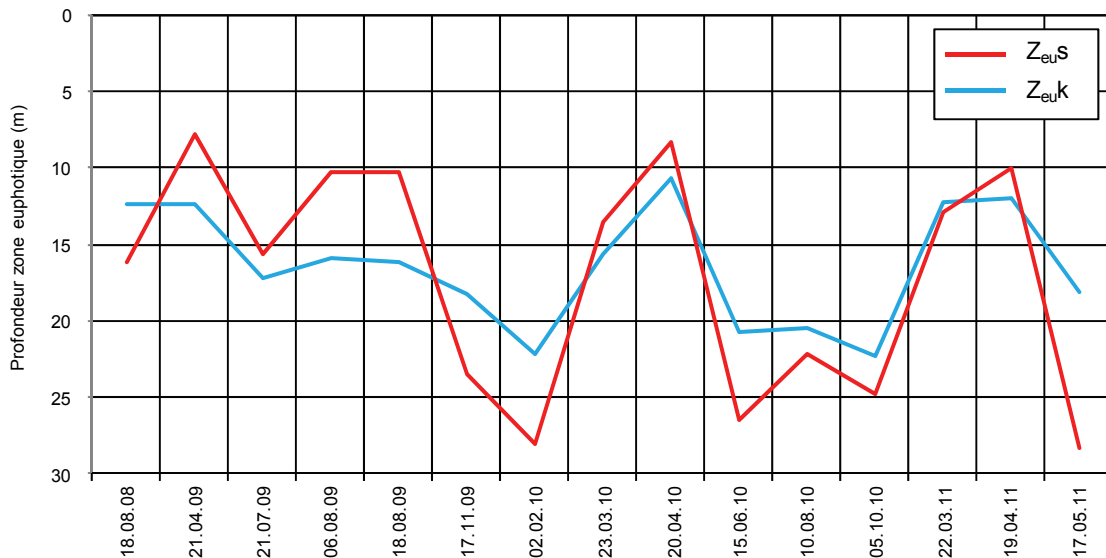


Figure 2 : Variation chronologique de l'estimation ($Z_{eu,s}$) et de la mesure de l'épaisseur de la zone euphotique ($Z_{eu,k}$).

Figure 2 : Time variation of the estimation ($Z_{eu,s}$) and measurement of the euphotic depth ($Z_{eu,k}$).

La relation de la profondeur Secchi avec $Z_{eu,k}$ et $Z_{eu,s}$ est indiquée sur la figure 3, avec des ajustements linéaire et non-linéaire, ce dernier de la forme :

$$Z_{eu,WN} = 7.43 \cdot Z_s^{0.44}$$

A noter qu'une relation linéaire ne passant pas par l'origine serait fautive, car elle impliquerait une zone euphotique d'environ 10 m pour une profondeur Secchi nulle. Les développements théoriques rapportés à l'Annexe 2 confirment parfaitement la relation non linéaire, permettant une meilleure estimation de la zone euphotique à partir de la profondeur Secchi pour le Petit-Lac et probablement le Léman. L'erreur moyenne de cette estimation est de ± 1.3 m. Cette estimation est encore provisoire, et devra être affinée au fur et à mesure de la disponibilité de nouvelles mesures optiques.

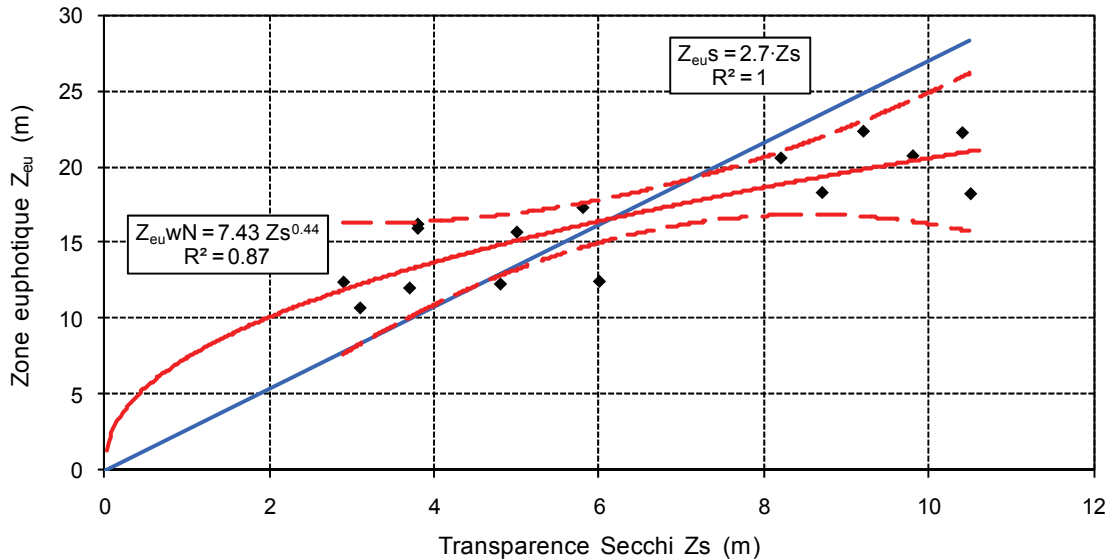


Figure 3 : Relation entre profondeur Secchi et deux estimations de la zone euphotique: points expérimentaux, ajustement linéaire (bleu) et non linéaire (rouge). Les courbes en tirets indiquent l'intervalle de confiance approximatif de l'ajustement non linéaire (seuil de 95%)

Figure 3 : Relationship between photic depth and Secchi transparency : measurements (dots), with linear (blue) and non-linear (red) fits. The dashed red lines indicate the 95% confidence interval for the non-linear estimate (95% threshold).

3.3 Biomasse algale

Bien que les concentrations en phosphore total soient à la baisse dans le Petit Lac (l'objectif de $20 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ comme valeur annuelle moyenne, fixé pour le Grand Lac par la CIPEL, est atteint depuis 2007), de très fortes productions algales sont encore observées.

Les biomasses annuelles du phytoplancton varient fortement entre 2006 et 2010 (figure 4).

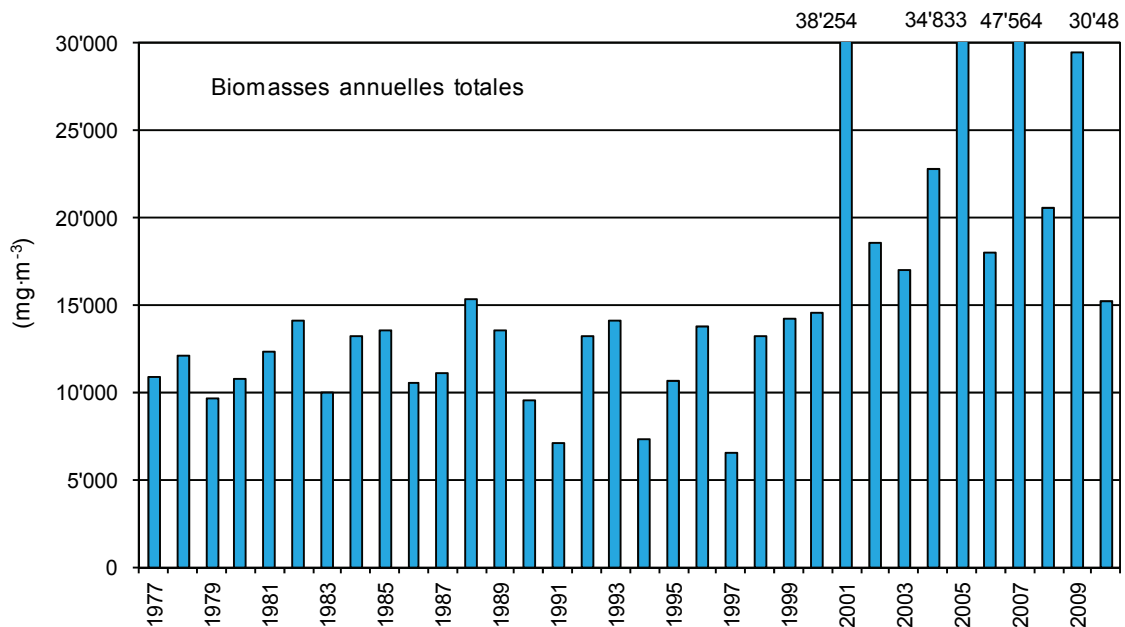


Figure 4 : Évolution des biomasses annuelles totales de phytoplancton entre 0-10 m de 1977 à 1999 et 0-20 m depuis 2000, à la station GE3.

Figure 4 : Change in the annual phytoplanktonic biomass at GE3 station at 0-10 m between 1977 and 1999, and at 0-20 m between 2000 and 2010.

Les années 2007 et 2009 se démarquent par de très fortes biomasses : plus de $47'000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ en 2007, ce qui représente la plus forte valeur calculée depuis le début du suivi du phytoplancton dans le Petit Lac en 1977.

En 2006, 2008 et 2010, les valeurs se situent entre $15'000$ et $20'000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, ce qui demeure relativement élevé.

3.4 Groupes pigmentaires

La figure 5 présente l'évolution interannuelle des principaux groupes pigmentaires.

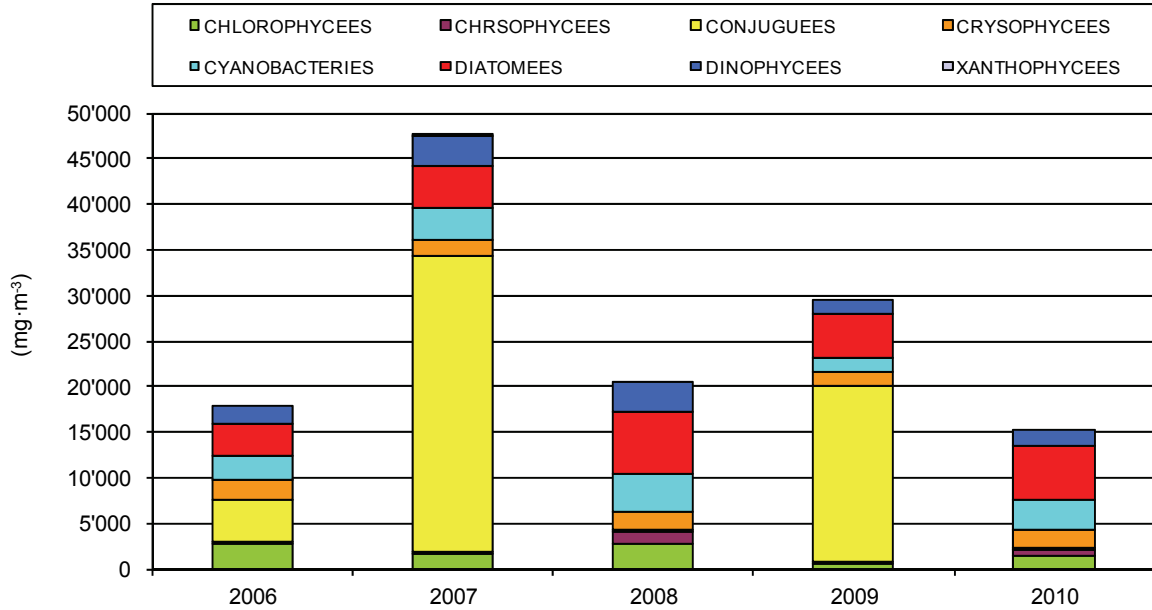


Figure 5 : Variations interannuelles des groupes pigmentaires de 2006 à 2010 à la station GE3.

Figure 5 : Inter-annual variation of pigment groups at GE3 station between 2006 and 2010.

Les conjuguées (Zygothécées), dominées par l'espèce *Mougeotia gracillima*, atteignent des biomasses exceptionnelles en 2007 et 2009, mais sont quasi absentes en 2008 et 2010. Ce comportement est pour l'heure mal compris.

En terme d'abondance relative, sur l'ensemble de la période quinquennale, les conjuguées dominent le peuplement avec 33%, suivies en ordre décroissant par les diatomées (24%), les cyanobactéries (14%), les dinophycées (10%), les cryptophycées (9%), les chlorophycées (9%) et les chrysophycées (2%). Le groupe des xanthophycées, très faiblement représenté dans le Léman, est pratiquement absent ; il ne fait qu'une faible apparition en 2007.

3.5 Microplancton et nanoplancton

Pendant toute la période étudiée, les espèces micro-planctoniques dominent la biomasse globale du phytoplancton (figure 6).

En 2007 et 2009, plus de 90% du microplancton est constitué de *Mougeotia gracillima*.

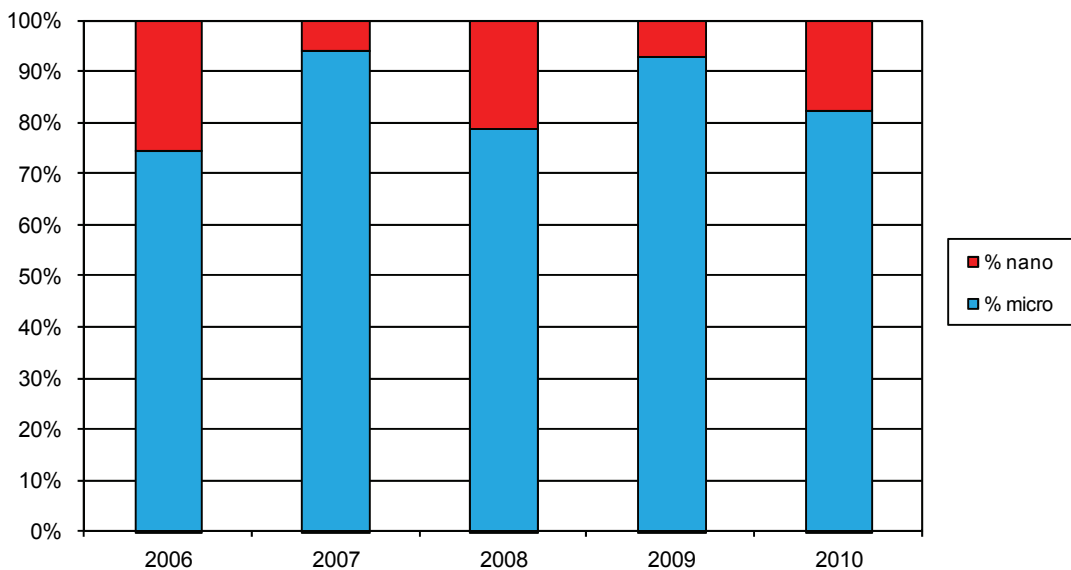


Figure 6 : Pourcentages relatifs de la biomasse annuelle du micro et nanoplancton à la station GE3 de 2006 à 2010.

Figure 6 : Relative proportions of micro- and nanoplankton at GE3 station between 2006 and 2010.

Les moyennes mensuelles des biomasses du micro et du nanoplancton montrent que le nanoplancton est nettement mieux représenté en période printanière (figure 7).

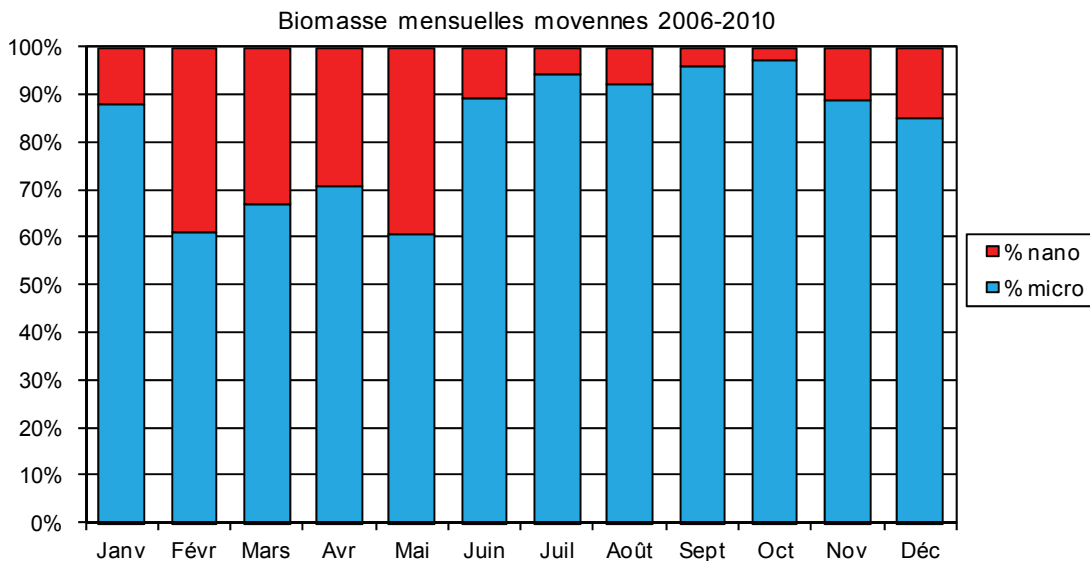


Figure 7 : Biomasses mensuelles moyennes du micro et nanoplancton pour la période 2006 à 2010 à la station GE3.

Figure 7 : Mean monthly biomass of micro- and nanoplankton at GE3 station between 2006 and 2010.

3.6 Cycles saisonniers

L'évolution saisonnière des biomasses algales pour les années 2006 à 2010 est illustrée à la figure 8.

La période hivernale est caractérisée par des valeurs basses, sauf en 2006 où nous observons de fortes biomasses de *Mougeotia gracillima* en janvier et décembre, accompagnée par la cyanobactérie *Planktothrix rubescens* en décembre.

La période printanière présente des profils variables. D'importants pics de croissance sont observés en mars 2008, en avril 2006 et 2008 et plus particulièrement en avril 2010.

En 2006, les valeurs élevées de février sont le fait du maintien de *Mougeotia gracillima* qui domine déjà le peuplement en janvier. On peut tout de même parler d'un "démarrage" printanier en février du fait de l'apparition d'*Aulacoseira islandica* subsp. *helvetica* et de *Rhodomonas minuta*, deux algues typiquement printanières.

La période des eaux claires est constatée en mai ou juin, sauf en 2007 où nous l'observons en avril.

Fait déjà commenté lors de la précédente période quinquennale, il n'est pas rare d'assister à la persistance de biomasses élevées durant la période automnale. C'est le cas en 2006, 2007, 2008 et 2009.

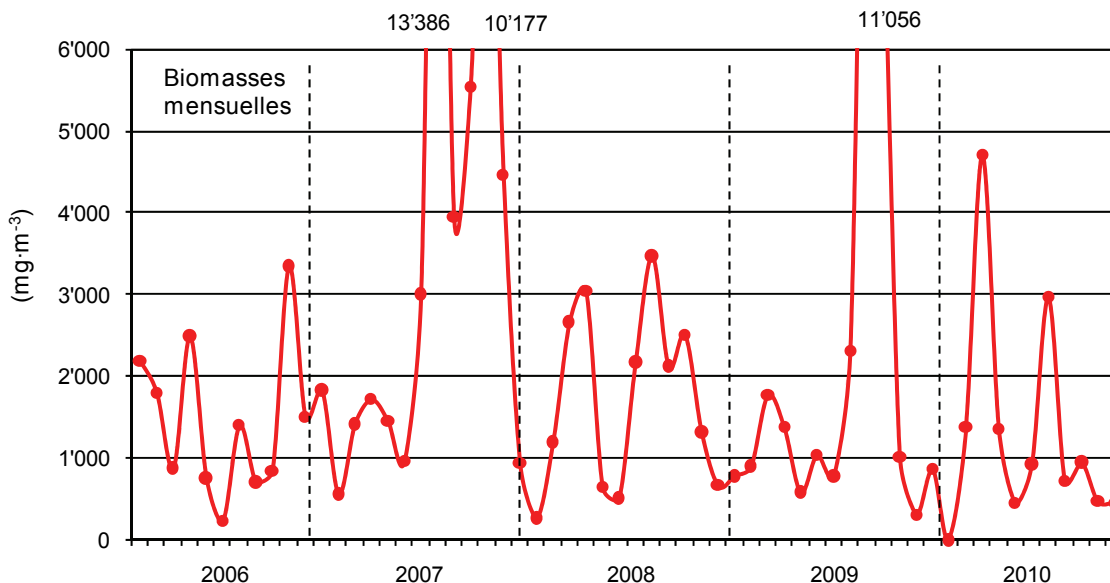


Figure 8 : Évolution saisonnière des biomasses algales de 2006 à 2010 à la station GE3.

Figure 8 : Seasonal evolution of the algal biomass at GE3 station between 2006 and 2010.

3.7 Biomasse estivale

Dans le Tableau de bord technique du Plan d'action 2001-2010 de la CIPEL, des valeurs limites à ne pas dépasser ont été fixées pour les moyennes estivales (juillet, août et septembre) des algues planctoniques :

• < 1'500 mg·m ⁻³ Objectif à atteindre)	= pas de nuisance*
• entre 1'500 et 3'000 mg·m ⁻³	= risque de nuisances*
• > 3'000 mg·m ⁻³	= nuisances* certaines

* nuisances : colmatage des filets de pêche et des filtres servant à la production d'eau potable, désagrément pour les baigneurs.

Tableau 1 : Biomasses moyennes estivales (juillet, août et septembre) des algues planctoniques de 2006 à 2010 à la station GE3.

Table 1 : Average summer biomass (July - September) of phytoplankton at GE3 between 2006 and 2010.

	Biomasses mensuelles (mg·m ⁻³)			Moyenne estivale
	Juillet	août	septembre	
2006	1'396	708	849	984
2007	13'386	3'951	5'540	7'626
2008	2'175	3'475	2'124	2'591
2009	778	2'313	11'056	4'715
2010	924	2'966	714	1'535

Les valeurs du tableau 12 montrent que la limite inférieure des biomasses moyennes estivales du phytoplancton a été dépassée durant toute la période quinquennale dans le Petit Lac, excepté pour 2006 et qu'en 2010, les valeurs sont à la limite.

Bien que la surveillance soit axée sur les valeurs **estivales**, les biomasses sont souvent également trop élevées en période **automnale**, comme l'indique le tableau 2.

Tableau 2 : Biomasses moyennes automnales (octobre et novembre) des algues planctoniques de 2006 à 2010 à la station GE3.

Table 2 : Average autumn biomass (October - November) of phytoplankton at GE3 station between 2006 and 2010.

	Biomasses mensuelles (mg·m ⁻³)		Moyenne automnale
	octobre	novembre	
2006	3'351	1'504	2'427
2007	10'177	4'462	7'319
2008	2'507	1'317	1'912
2009	7'545	1'019	4'282
2010	951	469	710

En effet, pendant la période quinquennale, quatre années sur cinq présentent des valeurs de biomasses automnales moyennes supérieures à 1'500 mg·m⁻³.

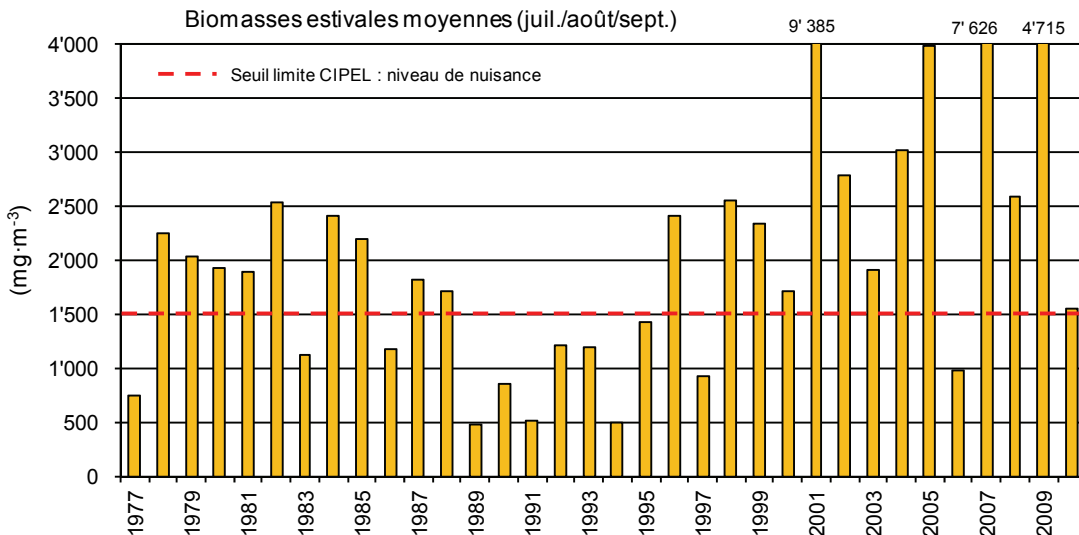


Figure 9 : Évolution des biomasses moyennes estivales (juillet, août et septembre) des algues planctoniques de 1977 à 2010 à la station GE3.

Figure 9 : Average summer planktonic algae biomass (July, August and September) at GE3 station between 2006 and 2010.

Les figures 9 et 10 illustrent que, si la trop forte croissance algale en période estivale est un problème constaté depuis la fin des années 70, le phénomène en période automnale semble s'être installé depuis le début des années 2000.

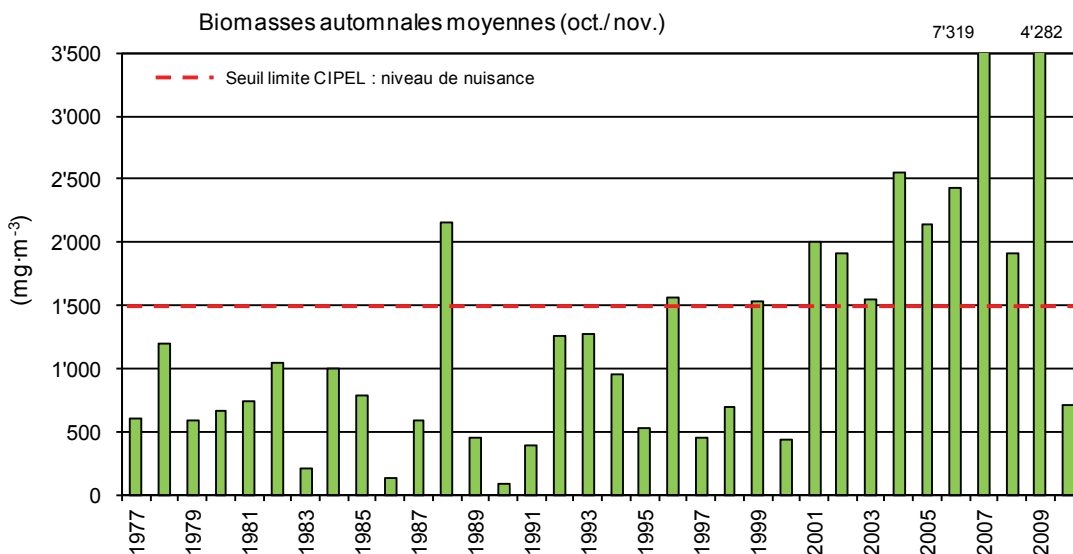


Figure 10 : Évolution des biomasses moyennes automnales (octobre et novembre) des algues planctoniques de 1977 à 2010 à la station GE3.

Figure 10 : Average autumn planktonic algae biomass (October and November) on at GE3 station between 1977 and 2010.

Le Tableau A présenté à l'Annexe 1 illustre d'une manière plus globale la distribution saisonnière des biomasses algales. Nous pouvons y observer que les mois de décembre et janvier, appartenant à la période hivernale et ayant généralement d'assez faibles biomasses, présentent entre 2004 et 2006 des valeurs anormalement élevées.

3.8 Diversité

De 2006 à 2010, les variations de l'indice de diversité sont très grandes (figure 11). Nous mesurons une variabilité maximale de la diversité sur ces cinq dernières années. Les faibles valeurs observées en 2007 et 2009 rappellent celles de l'année 2001, toutes trois correspondant à une très forte dominance de l'espèce *Mougeotia gracillima* sur le peuplement.

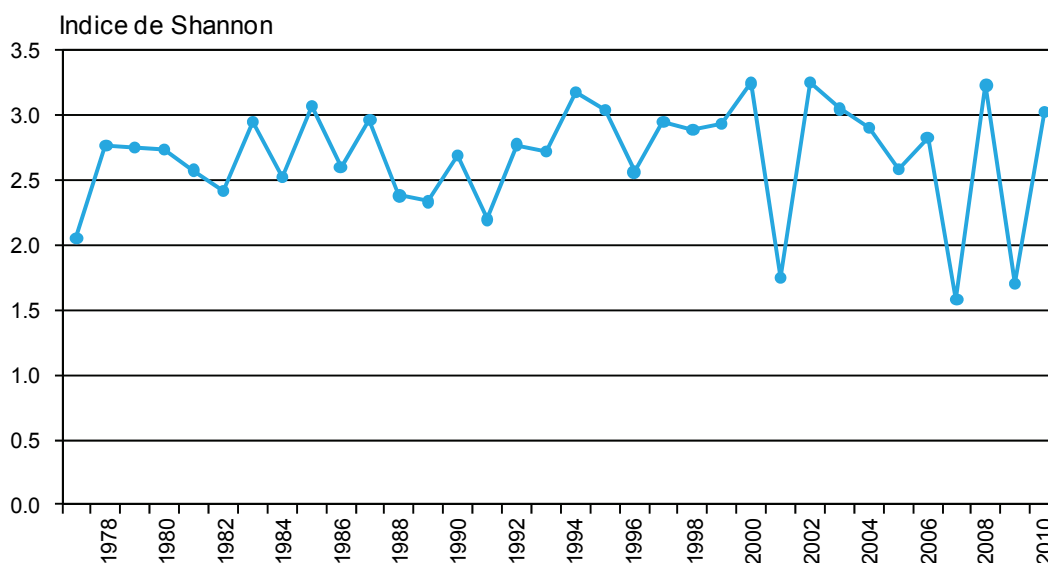


Figure 11 : Évolution interannuelle de l'Indice de diversité de Shannon, calculé à partir des valeurs de biomasses.

Figure 11 : Inter-annual variability of Shannon's diversity index, computed from the biomass data.

3.9 Taxons dominants et très dominants

Le calcul des biomasses des différents taxons permet de décrire leur abondance relative au cours de la période 2006-2010. Elles sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Pourcentages des espèces dominantes (1 à 6 % de la biomasse annuelle) et très dominantes (>6% de la biomasse annuelle), regroupées par groupes pigmentaires, de 2006 à 2010 à la station GE3.

Table 3 : Proportions of dominant (1 - 6% of annual biomass) and very dominant (>6%) species, according to pigment groups, at GE3 station between 2006 and 2010.

1 à 6 % Espèces dominantes					
> 6 % Espèces très dominantes					
Valeurs relatives (%) de la biomasse annuelle totale (mg·m ⁻³)					
CONJUGUEES	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Mougeotia gracillima</i>	23.67	68.21		64.51	
<i>Mougeotia sp. (grande cellule)</i>	0.95				
DIATOMEES	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Fragilaria crotonensis</i>	5.75		3.14	1.69	1.49
<i>Aulacoseira islandica subsp. helvetica</i>	4.23		1.65	7.24	1.42
<i>Diatoma tenuis</i>	4.09	1.78	7.97	1.10	
<i>Cyclotella spp./ stephano.minutululus (<9 µm)</i>	1.54		4.15	1.35	4.69
<i>Stephanodiscus neoastrae</i>	1.23	2.19	1.62		3.42
<i>Asterionella formosa</i>	1.04		1.51	2.20	3.83
<i>Cyclotella bodanica</i>		2.60	9.03		16.25
<i>Cyclotella comta (radiosa)</i>			1.50		2.03
<i>Cyclotella spp./ stephano.minutululus (>9 µm)</i>			1.10		2.10
<i>Fragilaria ulna var. angustissima</i>				2.09	2.87
CHLOROPHYCEES	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Chlamydomonas spp.</i>	11.20	1.17	5.58		
<i>Eudorina elegans</i>			1.26		
<i>Micractinium pusillum</i>			2.33		
<i>Pandorina morum</i>			1.23		
<i>Botryococcus braunii</i>					3.27
<i>Tetraselmis cordiformis</i>					1.44
<i>Sphaerocystis Schroederi</i>					1.06
CYANOBACTERIES	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	6.95		4.83		2.21
<i>Planktothrix rubescens</i>	6.75	2.78	2.78		
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>		3.00	11.17	3.39	16.97
<i>Aphanothece clathrata var. rosea</i>		1.17			
CRYPTOPHYCEES	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Rhodomonas minuta</i>	8.44	1.61	6.69	3.28	5.66
<i>Cryptomonas spp.</i>	2.77	1.13	1.37	1.44	5.10
<i>Rhodomonas minuta var. nannoplanctica</i>	1.33		1.33	1.14	2.35
DINOPHYCEES	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Ceratium hirundinella</i>	6.64		12.99	2.90	10.15
<i>Gymnodinium helveticum</i>	2.63	5.98			
<i>Peridinium willei</i>			1.51	0.99	
CHRYSOPHYCEES	2006	2007	2008	2009	2010
<i>Sphaerocea volvox</i>			2.99		
<i>Dinobryon divergens</i>					1.53
<i>Mallomonas acaroides</i>					0.95

De 2006 à 2010, 22 espèces sont dominantes et 10 sont très dominantes :

Le groupe des conjuguées est représenté par l'espèce *Mougeotia gracillima* qui est "très dominante" en 2006, 2007 et 2009. En 2006, son abondance relative n'est toutefois pas aussi élevée qu'en 2007 et 2009, c'est pourquoi elle n'a pas la même incidence sur l'indice de diversité.

Le comportement de cette algue filamenteuse reste énigmatique : atteignant des biomasses phénoménales certaines années (32'445 mg·m⁻³ en 2007), elle peut être quasi absente l'année suivante (104 mg·m⁻³ en 2008). Son évolution dans le Petit Lac se trouve à l'Annexe 1 au tableau B.

Les diatomées occupent également une place importante, tant en terme de diversité que de biomasse. Plusieurs espèces dominent le peuplement phytoplanctonique pendant presque toute la période quinquennale. *Cyclotella bodanica*, (anciennement *Cyclotella bodanica* var. *lemanensis*) diatomée typique de milieu oligotrophe (VAN DAM *et al.*, 1994), est très dominante deux années sur cinq ; elle atteint plus de 16% en 2010.

Les chlorophycées sont représentées par diverses espèces, mais de manière plus importante par les *Chlamydomonas* sp. qui sont très dominantes en 2006.

Quatre espèces de cyanobactéries sont dominantes, dont *Aphanizomenon flos aquae*, une hétérocystée fixatrice d'azote. Malgré des valeurs plus marquées chez trois d'entre elles (très dominantes), aucun dépassement de la norme recommandée par l'OMS (2'000 cellules par mL) n'a été observé au cours de la période quinquennale et aucun problème de toxicité n'est à relever.

La part des Cryptophycées est non négligeable : les *Cryptomonas* sp. et les espèces nanoplanctoniques *Rhodomonas minuta* et sa variété *nannoplanctica* ont une dominance quasi constante sur cinq ans.

La Dinophycée *Ceratium hirundinella* est très dominante trois années sur cinq.

Enfin, trois espèces de chrysophycées affichent une dominance plutôt modeste. Appartenant au même groupe pigmentaire, nous observons que les espèces du genre *Dinobryon*, algues mixotrophes adaptées à de faibles concentrations en nutriments (ANNEVILLE, 2001), sont peu présentes dans le Petit Lac en comparaison à ce qui est observé dans le Grand Lac (Tableau 4). Sachant que les concentrations en phosphore sont plus faibles dans le Petit Lac (moyenne pondérée de 13.3 µgP·L⁻¹ en 2010 pour 22.4 µgP·L⁻¹ dans le Grand Lac), ces données portent à réflexion.

Tableau 4 : Biomasses annuelles moyennes et maximales des espèces du genre *Dinobryon*, de 2006 à 2010 aux stations GE3 et SHL2.

Table 4 : Average and maximum annual biomass of the *Dinobryon* genus at stations GE3 and SHL2 between 2006 and 2010.

	Biomasses moyennes annuelles (mg·m ⁻³) <i>Dinobryon</i> (valeur maximale)	
	GE3	SHL2
2006	5 (138)	29 (121)
2007	2 (38)	23 (97)
2008	5 (135)	104 (872)
2009	3 (31)	193 (1'117)
2010	11 (220)	54 (641)

3.10 Chlorophylle a

Les concentrations de chlorophylle a mesurées entre 2006 et 2010 (figure 12) fluctuent de manière semblable à celles de la biomasse phytoplanctonique (figure 13).

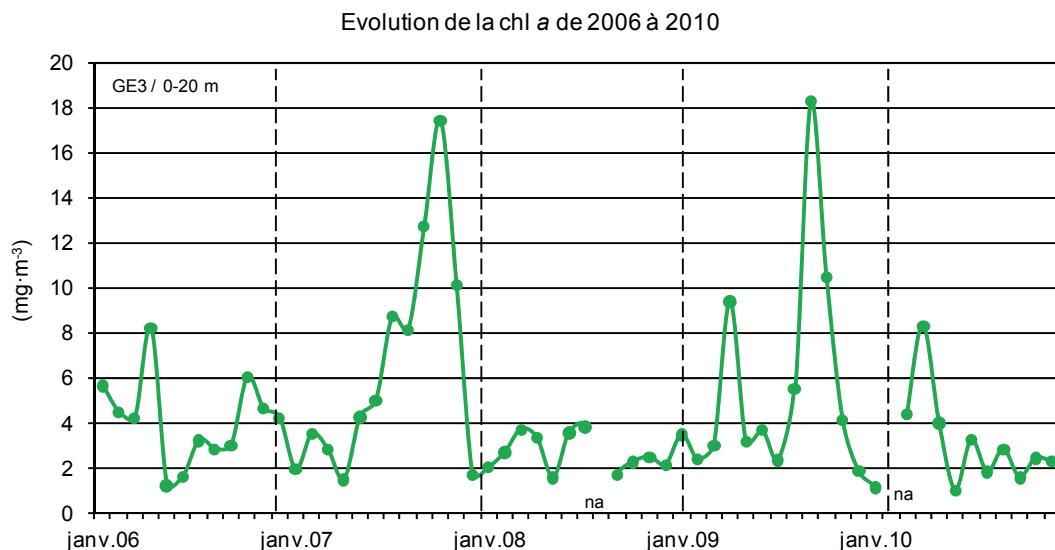


Figure 12 : Concentrations mensuelles de la chlorophylle a entre 0-20 m, à la station GE3 de 2006 à 2010.

Figure 12 : Monthly chlorophyll a concentrations (0-20 m) at GE3 station between 2006 and 2010.

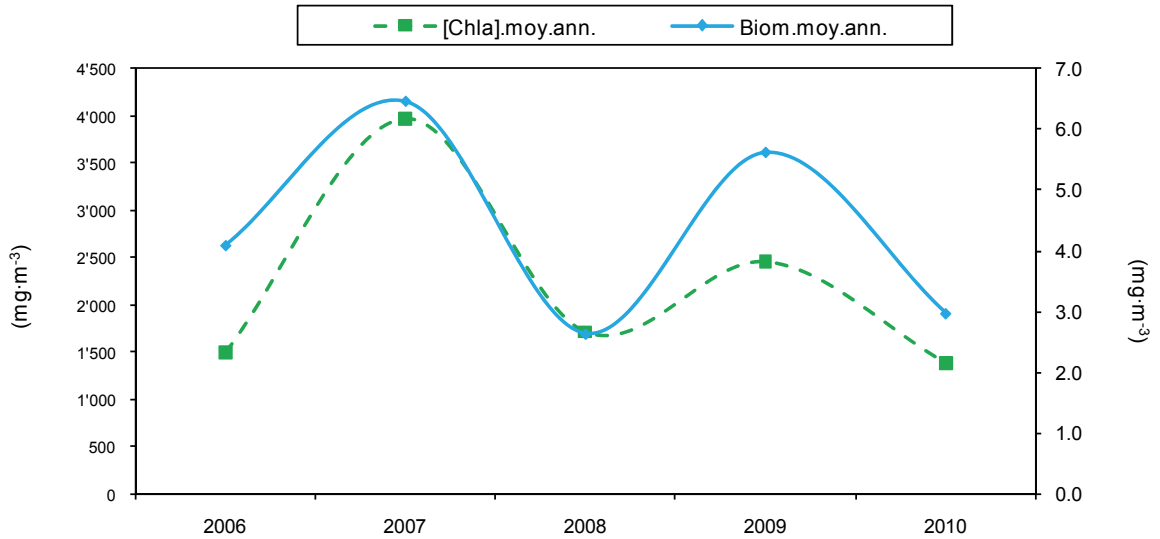


Figure 13 : Variations interannuelles des concentrations moyennes en chlorophylle a et biomasse phytoplanktonique entre 0 et 20 m, à la station GE3 de 2006 à 2010.

Figure 13 : Inter-annual variations of the average chlorophyll a concentration and phytoplankton biomass (0-20 m) at GE3 station between 2006 and 2010.

L'amplitude des concentrations en chlorophylle a est plus forte pour la période quinquennale 2006-2010 que pour la période précédente (LAVIGNE *et al.*, 2006). Les pics automnaux de 2007 et 2009 (figure 12) corroborent ceux de la biomasse algale.

En plus des dosages en laboratoire, le SECOE effectuée pour chaque campagne un profil de la chlorophylle a, de la surface jusqu'au fond, à l'aide d'une sonde multiparamétrique (FLNTUB, www.wetlabs.com). Ces profils permettent, entre autres, de suivre l'évolution des peuplements algaux tout au long de l'année, de situer le phytoplancton dans la colonne d'eau et d'en estimer la concentration.

L'échantillon du mois d'août 2008 n'a pu être dosé en laboratoire. Le profil de la sonde (figure 14), a permis de faire une estimation de la concentration en chlorophylle a (maximum voisin de 5 mg·m⁻³).

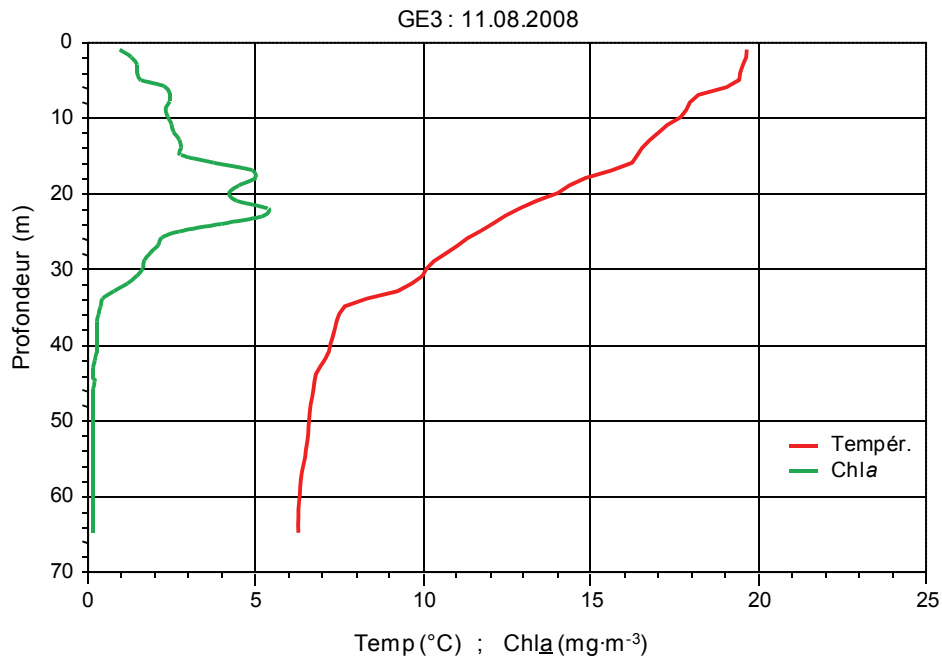


Figure 14 : Profils de chlorophylle a et température obtenus par la sonde multiparamétrique FLNTUB à la station GE 3 le 11 août 2008.

Figure 14 : Continuous profiles of chlorophyll a concentration and temperature recorded using the FLNTUB sensors at GE3 station on 11 August, 2008.

Sur de nombreux profils de chlorophylle a, nous observons que la tendance d'enfoncement du phytoplancton dans la colonne d'eau se poursuit. Ce constat avait justifié l'extension de la zone de prélèvements de 0-10 m à 0-20 m depuis 2000. De surcroît, il n'est pas rare d'observer des concentrations de chlorophylle a relativement importantes même au-delà de 20 mètres de profondeur. Cet enfoncement est en partie attribuable à l'appauvrissement des stocks de nutriments dans les couches superficielles, phénomène qui s'opère lors de l'oligotrophisation d'un plan d'eau.

4. CONCLUSIONS

L'étude du phytoplancton du Petit Lac de 2006 à 2010 présente des similitudes avec la période quinquennale précédente. En effet, malgré la poursuite de la baisse des concentrations en phosphore total, nous observons toujours une persistance de biomasses algales annuelles importantes, avec un décalage des concentrations élevées dans la seconde partie du cycle annuel. Ce phénomène, également observé dans le Grand Lac, est sans doute lié aux changements physico-chimiques qui s'opèrent dans le Léman depuis quelques décennies.

Le phénomène d'hystérèse décrit par ANNEVILLE (2001) et auquel nous assistions déjà de 2001 à 2005, se poursuit : l'algue filamenteuse *Mougeotia gracillima* trouve encore visiblement des conditions avantageuses qui lui permettent une colonisation massive des couches plus profondes.

BIBLIOGRAPHIE

- ANNEVILLE, O. (2001) : Diagnostic sur l'évolution de l'état de santé écologique du Léman par l'analyse des séries chronologiques du phytoplancton. Thèse INRA Thonon-les-Bains, 307 p.
- BRACCHINI, L., DATTOLO, A.M., HULL, V., LOISELLE, S.A., TOGNAZZI, A. et ROSSI, C. (2009) : Modeling upwelling irradiance using Secchi disk depth in lake ecosystems. J. Limnol., 68(1), 83-91.
- BUKATA, R.P., JEROME, J.H. et BRUTON J.E. (1988) : Relationships among Secchi disk depth, beam attenuation coefficient, and irradiance attenuation coefficient for Great Lakes waters. J. Great Lakes Res., 14(3), 347-355.
- CIPEL (2010) : Plan d'action 2001-2010 - Tableau de bord technique. Ed. CIPEL, Nyon-Changins, 69 p.
- DAVIES-COLLEY, R.J., VANT, V.N. et SMITH, D.G. (1993) : Colour and clarity of natural waters. Ellis Horwood, London, 310 p.
- DRUART, J.C. et RIMET, F., 2008 : Protocoles d'analyse du phytoplancton de l'INRA : prélèvement, dénombrement et biovolumes. INRA-Thonon, Rapport SHL 283 - 2008, 96 p.
- JAQUET, J.-M., SCHANZ, F., BOSSARD, P., HANSELMANN K. et GENDRE, F. (1994) : Measurement and significance of bio-optical parameters for remote sensing in two subalpine lakes of different trophic state. Aquatic Science, 56(3), 263-305.
- KIRK, J.T.O (1994) : Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press, London, 399 p.
- KOENINGS, J.P. et EDMUNDSON, J.A. (1991) : Secchi disk and photometer estimates of light regimes in Alaskan lakes: effects of yellow color and turbidity. Limnol. Oceanogr., 36, 91-105.
- KRATZER, S., HAKANSON, B. et SAHLIN, C. (2003) : Assessing Secchi et photic zone depth in the Baltic Sea from satellite data. Ambio, 32(8), 577-585.
- LAVIGNE (2005) : Le phytoplancton du Petit Lac : Évolution de 1993 à 2003. Service de l'écologie de l'eau de l'état de Genève, 35 p.
- LAVIGNE, S., CORDONIER, A., GALLINA, N. et PERFETTA, J. (2006) : Évolution du phytoplancton du Petit Lac.- Campagnes 2001-2005. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, 101-116
- LAZZAROTTO, J. et RAPIN, F. (2010) : Évolution physico-chimique des eaux du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2009, 31-56.
- PADIAL, A.A. et THOMAZ, S.M. (2008) : Prediction of the light attenuation coefficient through the Secchi disk depth: empirical modeling in two large Neotropical ecosystems. Limnology, 9, 143-151.
- PELLETIER, J. P. et ORAND, A. (1978) : Bouteille à prélèvement intégré - Mode d'emploi. INRA Thonon, France, 9 p.
- POOLE, H.H. et ATKINS, W.R. (1929) : Photo-electronic measurements of submarine illumination throughout th year. J. Mar. Biol. Assoc., 16, 297-394.
- REVACLIÉ (1996) : Le phytoplancton du Petit Lac : évolution de 1986 à 1995. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1995, 133-152.
- REVACLIÉ, R. (2001): Le phytoplancton du Petit Lac : évolution de 1996 à 2000. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2000, 90-108.
- RIMET, F. (2010) : Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2009, 77-88.
- RØRSLETT, B, SCHWARZ, A.M. et HAWES, I. (1996) : Underwater light profiles in some New Zealand lakes: a comparison of log-linear and Weibull models. New Zeal. J. of Marine and Freshwater Res., 30, 477-484.
- SERVICE DE L'ÉCOLOGIE DE L'EAU DE L'ÉTAT DE GENEVE (2010) : Etat écologique du Petit Lac en 2008, 91 p.
- STRICKLAND, J.D.H. et PARSONS, T.R. (1968) : A practical handbook of sea water analysis. Bull. Fish. Res. Bd Canada, 167, 311p.
- UTERMÖHL, H. (1958) : Zür Vervollkommung der quantitative Phytoplankton Methodik. Mitt. Internat. Ver. Theor. Angew. Limnol. 9, 1-38.

VAN DAM, H., RERTENS, A. et SINKELDAM, J. (1994) : A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from Netherlands. Netherlands J. of Aquatic Ecology, 28, 117-133.


WETZEL, R.G. et LICKENS, G.L. (2000) : Limnological Analyses, Third edition. Springer-Verlag New York.

Tableau A : Évolution des biomasses de phytoplancton de 1977 à 2010 à la station GE3.

Table A : Phytoplankton biomasses between 1977 and 2010 at GE3.

Evolution des biomasses (mg·m ⁻³) mensuelles dans le Petit Lac (GE3) de 1977 à 2010													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Tot. ann.
1977	85	173	2'393	653	4'130	-	256	1'348	614	1'215	13	52	10'932
1978	27	171	895	823	648	199	4'100	1'087	1'586	2'174	231	152	12'094
1979	82	94	176	508	1'038	44	2'788	1'809	1'529	278	908	445	9'698
1980	73	116	256	1'161	602	1'099	443	1'070	4'245	705	637	347	10'754
1981	101	128	1'085	2'040	1'548	238	483	3'102	2'073	1'160	337	76	12'372
1982	94	161	102	1'725	390	1'383	5'963	1'030	591	853	1'242	577	14'111
1983	252	252	1'438	1'889	1'931	205	1'585	687	1'113	332	101	239	10'024
1984	92	176	537	1'108	1'261	86	2'519	3'723	1'013	1'169	831	682	13'196
1985	349	196	340	734	2'753	555	4'032	594	1'966	736	835	420	13'512
1986	418	512	1'109	361	3'568	218	800	648	2'088	41	228	563	10'555
1987	256	468	457	652	2'225	268	2'902	1'782	792	900	275	174	11'152
1988	315	577	344	1'153	3'074	217	659	809	3'696	4'190	132	129	15'294
1989	31	113	2'996	7'417	259	210	721	186	516	765	156	142	13'512
1990	241	805	-	1'027	3'498	1'063	963	1'090	528	157	18	188	9'579
1991	101	212	357	1'121	515	2'330	1'014	385	144	216	584	129	7'108
1992	103	91	1'979	1'185	2'561	785	441	2'000	1'206	916	1'610	318	13'196
1993	214	496	2'542	2'348	1'459	578	1'443	1'198	961	2'244	323	262	14'068
1994	176	338	386	1'663	271	640	781	336	391	700	1'209	439	7'330
1995	235	146	592	1'694	853	1'745	1'075	786	2'427	797	267	73	10'691
1996	261	414	1'213	628	427	244	1'730	1'593	3'932	2'839	294	152	13'728
1997	88	398	1'096	247	127	380	564	305	1'933	247	674	520	6'579
1998	557	160	651	1'376	648	558	1'165	3'669	2'812	983	418	258	13'256
1999	755	325	863	964	239	815	2'238	2'854	1'938	2'910	161	162	14'225
2000	321	1'018	2'177	2'356	1'068	762	1'811	2'544	771	737	160	859	14'585
2001	796	1'362	690	1'141	648	739	3'806	21'307*	3'043	3'202	805	713	38'254
2002	647	596	592	444	559	2'944	2'631	3'127	2'607	2'286	1'542	573	18'550
2003	298	1'328	1'655	2'720	662	1'022	3'208	1'848	675	2'202	908	517	17'043
2004	1'177	309	397	1'063	1'859	1'560	1'219	3'829	4'010	3'797	1'307	2'259	22'786
2005	4'271	2'526	1'916	2'668	1'649	494	6'082	4'346	1'522	1'391	2'893	5'078	34'833
2006	2'191	1'793	874	2'493	753	235	1'396	708	849	3'351	1'504	1'832	17'978
2007	562	1'417	1'716	1'450	961	3'009	13'386*	3'951	5'540	10'177*	4'462	932	47'564
2008	264	1'194	2'665	3'038	639	507	2'175	3'475	2'124	2'507	1'317	664	20'571
2009	784	901	1'764	1'378	581	1'040	778	2'313	11'056*	7'545*	1'019	306	29'463
2010	859	-	1'378	4'713	1'358	451	924	2'966	714	951	469	458	15'240

< 1'500
1'500 à 3'000
> 3'000

Biomasse exceptionnelle : 

< 1'500 mg·m⁻³ (objectif à atteindre) = pas de nuisance*
 entre 1'500-3'000 mg·m⁻³ = risque de nuisances*
 > 3'000 mg/m³ = nuisances* certaines


* nuisances : colmatage des filets de pêche et des filtres servant à la production d'eau potable, désagrément pour les baigneurs.

Tableau B : Évolution des biomasses de l'espèce filamenteuse *Mougeotia gracillima* de 1977 à 2010 à la station GE3.

Table B : Biomasses of the filamentous species *Mougeotia gracillima* between 1977 and 2010 at GE3 station.

Evolution des biomasses (mg·m ⁻³) de <i>Mougeotia gracillima</i> dans le Petit Lac (GE3) de 1977 à 2010													
	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Tot. annuel
1977	44	21	0	4	0		149	325	284	686	2		1'515
1978	0							211	222	264	31	22	750
1979	1								0	49	23	63	136
1980									171	141	27	82	420
1981	29							2	80	148	19		279
1982								22	48	10	36	0	116
1983	1								21	42			64
1984													-
1985	0	0	0	0	0	0	0	0	85	15	101	24	226
1986	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
1987													-
1988									46	2	15		64
1989		3		2									6
1990													-
1991													-
1992									714	24	14	6	758
1993	0	0	0	0	0	0	0	558	2	31	5	0	596
1994								12					12
1995	0	4		0		10	5	25	753	47	1		845
1996	3	12	0	0	0	0	2	738	3'161	192	66	8	4'182
1997								5	480	48		8	540
1998	8	0	0	0	0	0	168	1'920	1416	93	1	0	3'607
1999	0	0	0	0	0	0	0	24	174	14	0	0	213
2000	0	0	0	2	0	0	0	6	0	84	0	11	103
2001	0	0	0	0	0	47	312	20'452*	2'785	366	120	0	24'081
2002	0	0	0	0	0	3	0	74	28	352	51	1	510
2003	1	0	1	1	0	1	114	170	142	40	1	1	469
2004	0	0	0	0	0	30	368	2'034	410	930	537	2'010	6'320
2005	2'632	1437	1	30	12	1	241	18	145	78	1'932	4'244	10'770
2006	1'829	767	12	0	0	0	0	6	97	187	634	724	4'256
2007	72	42	6	0	0	682	11'590*	1'606	5'149	9'055*	4'147	97	32'445
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	24	48	32	0	104
2009	1	1	0	1	0	0	48	1195	10'183*	6'972*	573	30	19'005
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

< 1'500
1'500 à 3'000
> 3'000

Biomasse exceptionnelle : 

< 1'500 mg·m⁻³ (objectif à atteindre) = pas de nuisance*
 entre 1'500-3'000 mg·m⁻³ = risque de nuisances*
 > 3'000 mg·m⁻³ = nuisances* certaines

* nuisances : colmatage des filets de pêche et des filtres servant à la production d'eau potable, désagrément pour les baigneurs.

Calcul de la profondeur de la zone euphotique

ANNEXE 2

Traditionnellement, la profondeur de la zone euphotique est estimée à l'aide de la transparence Z_s au moyen de la relation linéaire empirique :

$$Z_{eu} = f_1 Z_s \quad [1]$$

D'après GOLTERMAN *et al.* (1978), $f_1 = 2.5$. Pour le Léman, f_1 a été fixé à 2.7, suivant POURRIOT et MEYBECK (1995).

Le SECOE dispose d'un certain nombre de mesures du champ radiatif dans l'air et dans l'eau, récoltées lors des campagnes à la station GE3. Plus précisément, l'irradiance spectrale descendante E_d et la radiance spectrale montante sont mesurées sur profils, ce qui permet, entre autres, de calculer le coefficient d'atténuation diffus de l'éclairement descendant K_d dans le domaine « PAR » (Photosynthetically Available Radiation, 400 à 700 nm. voir JAQUET *et al.*, 1994, formule 2 ; RØRSLETT *et al.*, 1996).

Par ailleurs, K_d a souvent été estimé au moyen de la transparence Secchi (BUKATA *et al.*, 1988 ; KRATZER *et al.*, 2003) à l'aide d'une relation hyperbolique de la forme :

$$K_d = \kappa Z_s^{-b} \quad [2]$$

Le plus souvent, $b = 1$ et $\kappa = 1.7$. Cette dernière valeur a été originellement déterminée dans la Manche (POOLE et ATKINS 1929). En réalité, κ et b varient passablement selon les milieux (KOENINGS et EDMUNDSON, 1991, Table 6 ; JAQUET *et al.*, 1994 ; PADIAL et THOMAZ, 2008 ; BRACCHINI *et al.*, 2009). Appliquant la valeur de 1.7 pour le coefficient κ peut donc introduire de grandes erreurs dans la détermination de K_d (DAVIES-COLLEY *et al.*, 1993, p.77).

La zone euphotique représente la tranche d'eau dont la limite inférieure correspond à un niveau d'éclairement égal à 1% de sa valeur de surface. Z_{eu} est formellement défini, pour autant que K_d ne varie que peu avec la profondeur (KIRK, 1994, p.113 ; KRATZER *et al.*, 2003) comme :

$$Z_{eu} \approx 4.6 K_d^{-1} \quad [3]$$

En combinant les relations [1] à [3], on peut démontrer que pour $f_1 = 2.7$, on obtient $\kappa = 1.7$ et $b = 1$. A la lumière de la théorie, la valeur de 2.7 attribuée à f_1 pour le Léman paraît donc pour le moins arbitraire.

Il est possible d'améliorer la représentativité de la relation entre Z_s et Z_{eu} en utilisant les valeurs de $K_{deu,W}$ mesurées au cours de 15 campagnes à GE3, qui sont reportées avec les profondeurs Secchi correspondantes sur la figure A.

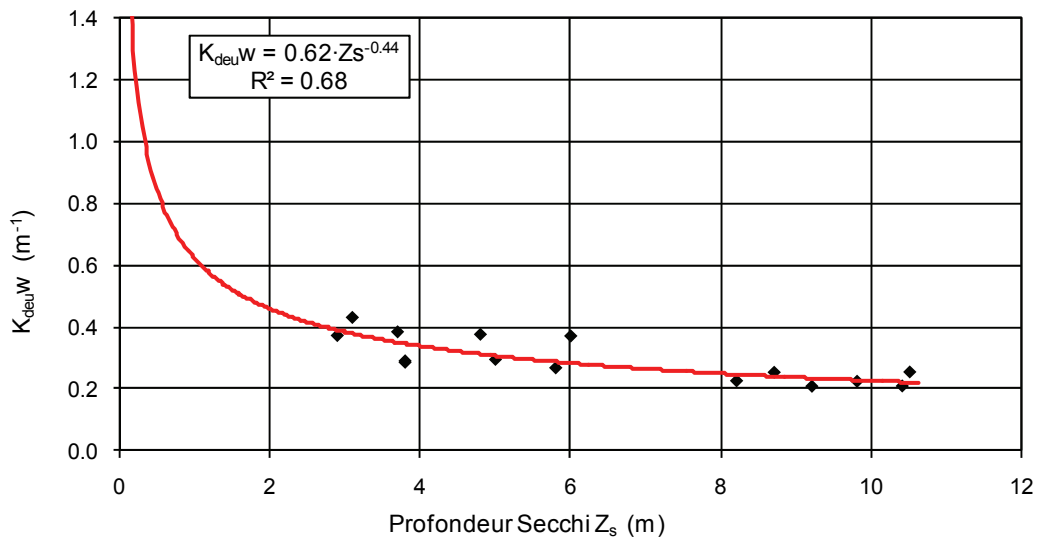


Figure A : Relation entre Z_s et $K_{deu,W}$ à GE3, avec ajustement non-linéaire.

Figure A : Relationship between Z_s and $K_{deu,W}$ at GE3, with non-linear fit.

L'ajustement statistique par la fonction de puissance [2] donne

$$K_{deu,W} = 0.62 Z_s^{-0.44} \quad [4]$$

($\kappa = 0.62$ et $b = 0.44$), et explique 70% de la variance, ce qui est acceptable. La forte remontée de $K_{deu,W}$ vers les faibles valeurs de Z_s provient du fait que $K_d \rightarrow \infty$ pour $Z_s \rightarrow 0$.

Substituant [4] dans [3] donne :

$$Z'_{eu} \approx 7.435 Z_s^{0.44} \quad [5]$$

[5] confirme donc la relation qui est reportée sur la figure 3, obtenue par ajustement non-linéaire direct de Z_{eu} sur Z_s . Les relations [4] et [5] respectent toutes deux le fait que la profondeur de la zone euphotique tend vers zéro quand la transparence tend vers zéro ($Z_{eu} \rightarrow 0$ pour $Z_s \rightarrow 0$). Lors de la prédiction de Z_{eu} en utilisant Z_s et [5], l'incertitude moyenne est approximativement de ± 1.3 m.

Au vu du nombre restreint des valeurs disponibles de $K_{deu,W}$, cette relation est encore provisoire. Elle pourra être améliorée par la prise en compte d'autres profils radiométriques non encore traités, tirés de la base de données du SECOE et de nouvelles mesures en cours .