



HAL
open science

Synthèse du suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2022

Stéphan Jacquet, Jean-Noël Avrillier, Sébastien Cachera, Laura Crépin, Victor Frossard, Chloé Goulon, Jean Guillard, Valérie Hamelet, Jean-Christophe Hustache, Leslie Lainé, et al.

► **To cite this version:**

Stéphan Jacquet, Jean-Noël Avrillier, Sébastien Cachera, Laura Crépin, Victor Frossard, et al.. Synthèse du suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2022. Inrae. 2023. hal-04682453

HAL Id: hal-04682453

<https://hal.science/hal-04682453v1>

Submitted on 30 Aug 2024

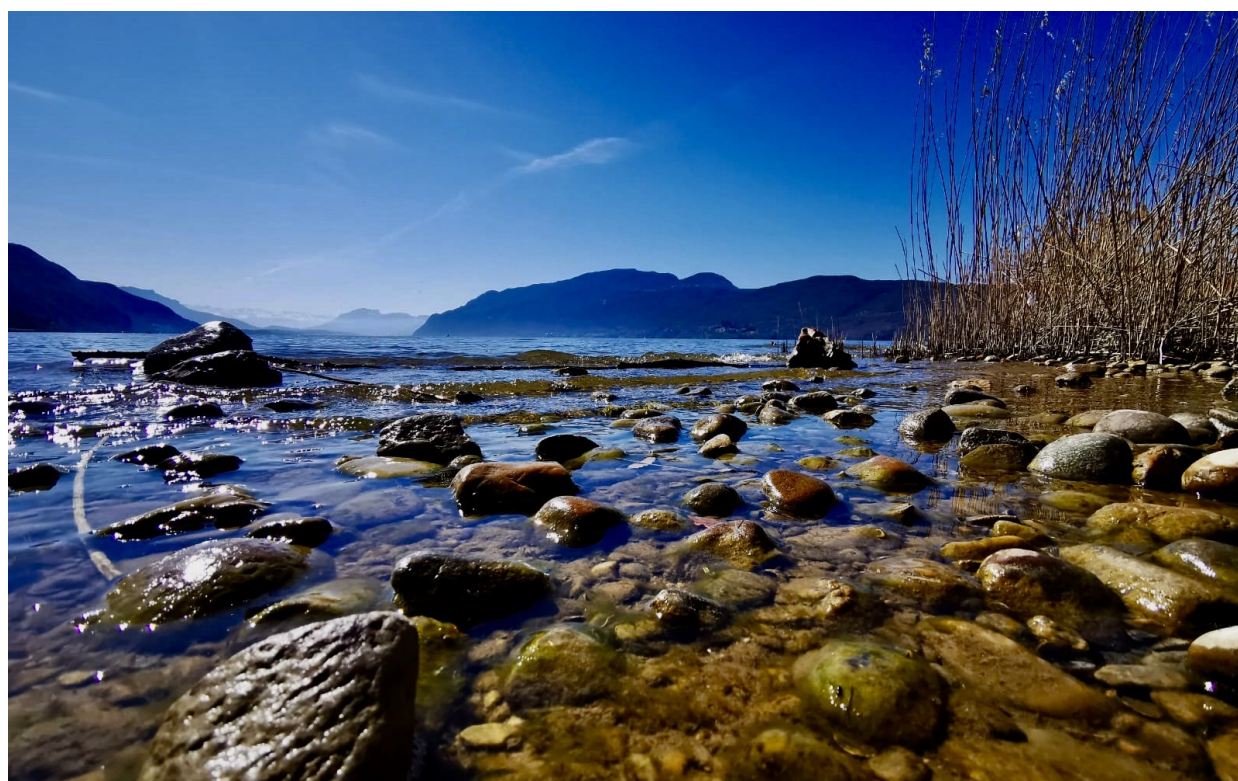
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Synthèse du

SUIVI SCIENTIFIQUE DU LAC DU BOURGET

pour l'année 2022



Document validé par le comité scientifique (juin 2023)



Citation de ce document

Jacquet, S., J.-N. Avriillier, S. Cachera, C. Costel, L. Crépin, V. Frossard, C. Goulon, J. Guillard, V. Hamelet, J.C. Hustache, L. Laine, P. Perney, P. Quétin, J. Raphy, C. Rautureau, F. Rimet, S. Rasconi, V. Tran-Khac. 2023. Suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2022. *Rapport INRAE-CISALB*, 29 pages.

RÉSUMÉ

2022 a encore été une année remarquable sur de nombreux aspects.

L'année 2022 a été la plus chaude enregistrée depuis le début du siècle dernier. La **température de l'air moyenne annuelle a été de 13,6°C**, soit >1,7°C de plus que 2021 et correspondant à un écart de **+1,7°C (+14,3%)** par rapport à la moyenne 1990-2020. **2022 confirme donc la tendance au réchauffement global** enregistré au cours des quatre dernières décennies (la température moyenne fluctuant entre 10 et 11°C dans les années 1970). Exception faite du mois de janvier qui a été significativement plus froid que la moyenne (2,3°C ; -20% par rapport à la moyenne), tous les autres mois de l'année ont présenté des valeurs équivalentes ou supérieures à la moyenne (de 0 à +48%). Parmi les mois les plus chauds, février a été remarquable (5,9°C ; +44%). Les mois de mai, juin, juillet et août ont été plus chauds de 13 à 17% par rapport à la moyenne. **L'automne a été particulièrement chaud**, les mois d'octobre, novembre et décembre affichant des températures moyennes records de 15,7°C, 9°C et 5,1°C soit +28%, +31% et +48% par rapport à la moyenne.

Logiquement, la température moyenne de l'eau du lac du Bourget a été impactée. **2022 a ainsi été l'année la plus chaude** en ce qui concerne la température de l'eau mesurée en surface, à 2 m de profondeur. Avec une température moyenne annuelle de 16,5°C, soit ~1,5°C de plus que l'année 2021 et ~0,9°C de plus que l'année 2020, l'évolution interannuelle des températures moyennes montre toujours une **tendance nette au réchauffement depuis 1984**. Comparativement, si une tendance nette à l'augmentation des températures au fond du lac n'a pas été mesurée (comme en surface) au cours des quatre dernières décennies, on constate toutefois que, **depuis 2012, la température du fond augmente doucement mais sûrement, étant passé en moyenne annuelle de 5,25 à 6,6°C**. Les conditions météorologiques avec notamment un mois de janvier 2022 très froid ont permis un **brassage complet** avec refroidissement et homogénéisation totale de la colonne d'eau enregistrée mi février.

Comme les années précédentes, **2022 a été caractérisée par des périodes contrastées en termes de précipitations, mais surtout par un déficit marqué**. 980 mm de pluie sont tombés soit près de 18% de moins que la moyenne 1990-2020 (1195 mm), l'année précédente (2021) se situant dans la moyenne. Comme chaque année, une forte variabilité a été observée avec quelques mois pluvieux (+35% en septembre, +14% en novembre et +28% en décembre) précédés par de nombreux mois secs (-11% en février, -8% en juin, -11% en août, -2% en octobre) à très secs (-62% en janvier, -76% en mars, -65% en mai, -88% en juillet).

Le déficit pluvieux s'est traduit par des **débits moyens annuels de la Leysse et du Sierroz**, avec respectivement 4,9 m³ s⁻¹ et 1,42 m³ s⁻¹, **significativement inférieurs au module interannuel** (e.g. 6,22 m³ s⁻¹ pour la Leysse et 2,43 m³ s⁻¹ pour le Sierroz). Pour l'ensemble des paramètres analysés en 2022, tout

comme les années précédentes (e.g. 2019, 2020 et 2021), le **Sierroz a présenté des concentrations en nutriments plus élevées que la Leysse**. Ainsi la concentration moyenne en P_{tot} a été de 58 µg L⁻¹ (vs 55 µg L⁻¹ en 2021 et 70 µg L⁻¹ en 2020) pour la Leysse et de 108 µg L⁻¹ (vs 236 µg L⁻¹ en 2021 et 154 µg L⁻¹ en 2020) pour le Sierroz.

Comparativement à 2021, l'hiver 2022 a donc permis une **homogénéisation complète** de la température de l'eau du lac ainsi que de la concentration **en oxygène dissous**. Ce brassage a surtout opéré au mois de janvier qui a été très froid si bien que l'homogénéisation a eu lieu mi février (plus tôt qu'habituellement), la différence de température entre la surface (**6,7°C**) et le fond (**6,5°C**) n'étant alors que de 0,2°C. La concentration maximale en oxygène au fond a atteint le 10 février la valeur de **10 mgO₂ L⁻¹**.

Les concentrations hivernales moyennes (sur la période incluant janvier, février et mars) en **orthophosphates (P-PO₄) et phosphore total (P_{tot})**, avec respectivement des valeurs de **4,4 et 8,9 µgP L⁻¹** ont été **très similaires à celles de 2021**. Ces concentrations restent parmi les plus basses de la chronique et confirment que le seuil des 10 µgP L⁻¹ a été franchi depuis longtemps. L'augmentation modeste observée entre 2017 et 2018 avait été mise en parallèle avec des **apports** conséquents des principaux tributaires (**Leysse et Sierroz**) soit 56 T de **phosphore total** contre environ 31,2 T en 2019, 25,8 T en 2020, 32 T en 2021 et **seulement 11,1 T en 2022**, qui est la **valeur la plus faible jamais enregistrée**.

Avec une **concentration moyenne annuelle en chlorophylle a de 2,3 µg L⁻¹**, cet indicateur continue de révéler une valeur relativement faible et constante depuis 2018 (entre 2,3 et 3 µg L⁻¹) et la confirmation d'une **baisse significative** par rapport aux années précédentes, avec des valeurs depuis 2009 oscillant entre 2,3 et 4 µg L⁻¹ (moyenne <3,2 µg L⁻¹). C'est la 5^{ème} année consécutive que la concentration moyenne annuelle est **sous la barre des 3 µg L⁻¹**. Cette valeur de concentration de la chlorophylle *a*, considérée uniquement pour la **période estivale**, a aussi été **faible en 2022 (avec 2,7 µg L⁻¹)**, bien que légèrement supérieure à la valeur enregistrée en 2021 (e.g. 2,4 µg L⁻¹).

La **biomasse phytoplanctonique annuelle (avec 1 243 µg L⁻¹) a augmenté par rapport à 2021** (e.g. 1 051 µg L⁻¹) **mais reste plus basse que celle des années précédentes** (e.g. 1 323 µg L⁻¹ en 2020, 1 510 µg L⁻¹ en 2019, 1250 µg L⁻¹ en 2018 ou encore 1 643 µg L⁻¹ en 2017). Les **indices fonctionnels de Brettum (4,06) et IPLAC (0,65)**, ont diminué par rapport à 2021 (qui étaient respectivement de 4,45 et 0,78) mais continuent de signer un **bon état global de l'écosystème pélagique**. Depuis le début de la chronique, avec la baisse des concentrations en phosphore en lien avec la réoligotrophisation du lac, on observe également un **enfouissement de la communauté des picocyanobactéries dans la colonne d'eau et une augmentation faible mais significative de leur biomasse et de leur contribution à l'ensemble de la biomasse phytoplanctonique totale**. En 2022, cette **contribution a été la plus élevée** depuis le début de la chronique (commencée en 2004) atteignant la valeur de **19,7%** vs 15,7% en 2021 et 17,3% en 2020.

La **transparence moyenne annuelle** de la colonne d'eau observée depuis la surface a été de **6,2 m** soit une valeur comparable à 2021 (e.g. 6,0 m) et inférieure à celle enregistrée en 2020 où elle avait été de 7,3 m, comme en 2019 (e.g. 7,2 m). Le lac ne semble pas avoir été caractérisé par une phase d'eaux claires marquée aux mois de mai et juin, un constat devenu assez récurrent au cours de la dernière décennie.

Si la **dynamique du zooplancton** a reproduit globalement celle des années précédentes, elle a été une nouvelle fois **remarquable en 2022**. Les **espèces herbivores** ont constitué une **partie importante de la communauté totale zooplanctonique**, représentant en moyenne 63% des effectifs totaux. Leur dynamique a été fortement liée à la communauté phytoplanctonique. Le suivi du **biovolume sédimenté** a confirmé une **tendance à la baisse depuis 2019**, la moyenne annuelle étant de 112 ml m⁻² en 2015 vs 49 ml m⁻² en 2019 et 51 ml m⁻² en 2022. L'abondance moyenne annuelle du zooplancton crustacéen montre donc une tendance à la baisse depuis le début du suivi, à mettre surtout en lien avec la **baisse des cladocères** au cours de ces dernières années **mais aussi des calanoïdes** plus récemment. L'analyse des indices fonctionnels sur la période 2004-2022 a confirmé l'importance de la disponibilité des ressources nutritionnelles de bonne qualité (Diatomées et Chrysophycées) pour le maintien de l'efficacité trophique au sein du réseau pélagique. **La disponibilité de ressources adéquates permet la prolifération des espèces diversifiées et un transfert efficace vers les niveaux supérieurs.**

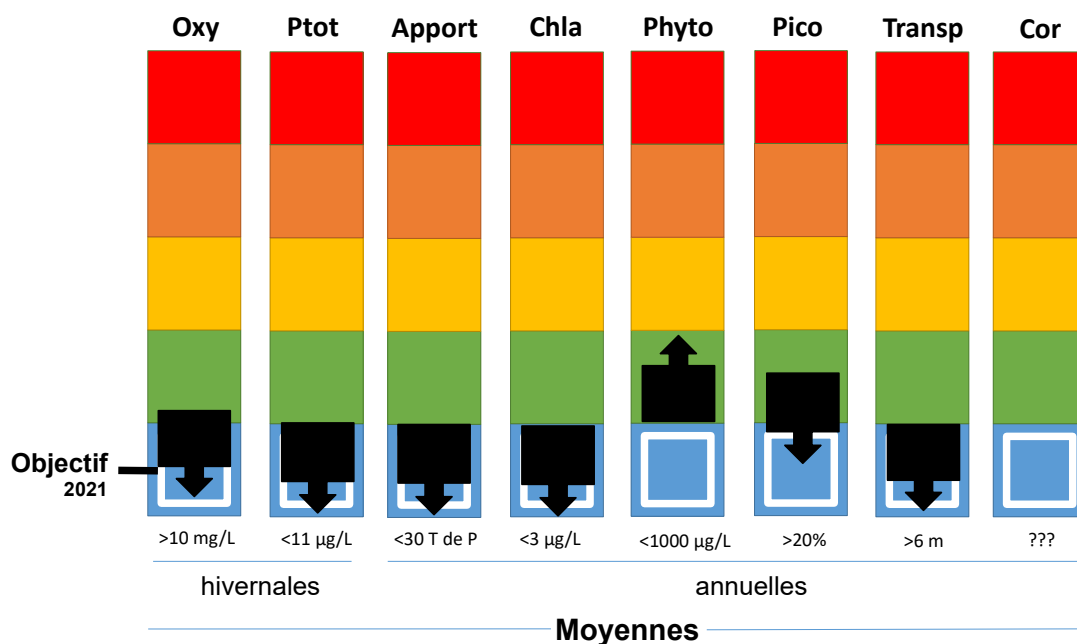
Comme les années précédentes, **la diversité piscicole du lac apparaît comme globalement stable en 2022**. Les **densités acoustiques** pour le **corégone** sont à des **niveaux hauts** et cette **forte abondance** est confirmée par des CPUE numériques scientifiques hautes dans les filets pélagiques et benthiques. Cependant **la baisse des captures de ce poisson se poursuit chez les pêcheurs professionnels** et indique que ces individus ne sont pas capturables. Parmi les raisons, la baisse du poids moyen et du nombre d'individus de grande taille, à mettre en relation avec la baisse de la quantité des proies zooplanctoniques au printemps et une plus forte compétition intraspécifique. Le **silure est bien installé** et occupe la 3^{ème} place en termes de rendement en biomasse. La **perche est à des niveaux élevés dans les filets benthiques** mais caractérisée par des **densités faibles en acoustique et dans les filets pélagiques**, sa distribution étant donc majoritairement littorale. *In fine*, **2022** peut se résumer par (i) des niveaux importants de corégones estimés par hydroacoustique et dans les pêches scientifiques aux filets, mais par des individus de petite taille révélant des ralentissements de croissance modifiant fortement les rendements de captures des pêcheurs ; (ii) une population de perche à un niveau très faible avec une distribution presque exclusivement benthique des juvéniles de l'année indiquant un faible recrutement ou une mortalité importante des juvéniles par la pêche ; (iii) la confirmation de l'absence de sandre depuis 2019 ; (iv) l'absence de poissons chats, et (v) la poursuite de l'augmentation du nombre de silures.

En 2022, le **compartiment macrobenthique** a été examiné révélant que le lac du Bourget dispose **en zone littorale d'une faune de très bonne qualité**. Il est noté toutefois que, comme les années

précédentes, **les conditions environnementales restent contraignantes en zone profonde** probablement en lien avec la **désoxygénation des eaux de fond**. Le maintien de cette désoxygénation malgré la réoligotrophisation du lac suggère le maintien d'une accumulation de la matière organique au niveau des sédiments limitant le développement de la macrofaune benthique. Enfin, l'observation pour la première fois dans le suivi de la **moule quagga** et plus généralement l'abondance des *Dreissena* sp dans les relevés, montre la forte installation de ces espèces exotiques envahissantes (EEE).

Le schéma ci-dessous tente de résumer une partie de **l'état et l'évolution du lac entre 2021 et 2022**. Le code couleur se lit du bleu (excellent) vers rouge (mauvais). Les chiffres proposés comme objectifs à atteindre pour la période 2020-2021 ont été validés par le conseil scientifique.

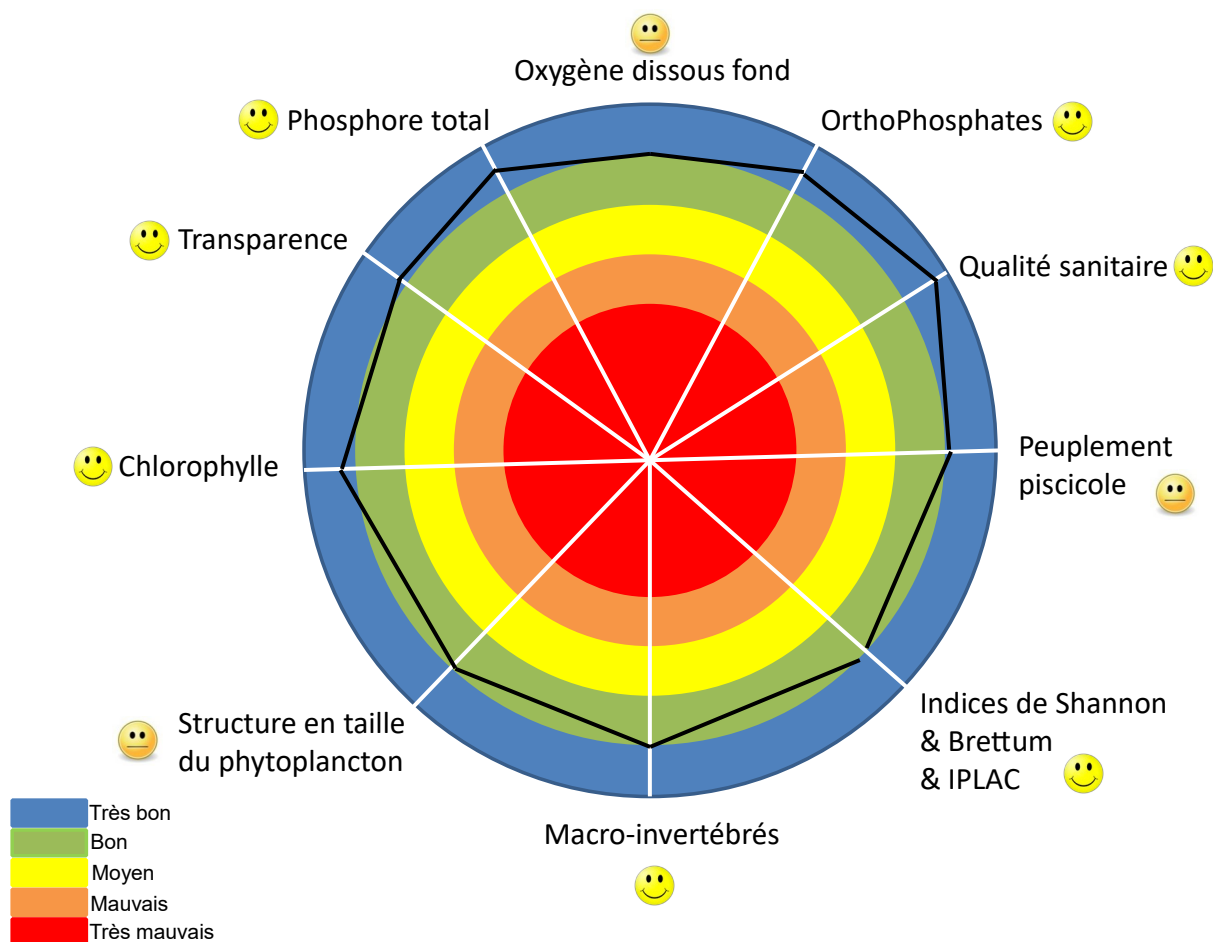
État (■) en 2022 et tendance (➡) depuis 2021 de l'état écologique du lac du Bourget



NB : Jusqu'en 2021 (rapport de suivi pour l'année 2020), un indicateur poissons (COR) était proposé, avec un objectif de 12 kg /ha pour les corégones. Il a été décidé de supprimer cet indicateur de la figure car il n'est pas un indicateur écologique *sensu stricto* et aussi parce que cet objectif a sûrement été surestimé. Une réflexion est en cours pour déterminer ce que sera le futur indicateur de la qualité écologique possiblement basé sur l'ensemble du peuplement piscicole.

2022 continue de s'inscrire dans la dynamique de réoligotrophisation générale du lac eu regard notamment de certains descripteurs comme les teneurs (très basses) en phosphore et chlorophylle *a*, la biomasse (relativement modeste) et la structure (en taille et en taxon) phytoplanctonique, des corégones abondants mais dont la croissance est ralentie. L'examen 2022 du lac du Bourget confirme donc un très bon état écologique global de l'écosystème pélagique. Le compartiment benthique révèle la bonne qualité du littoral vs une moindre qualité en profondeur. Le lac se réchauffe et a accueilli de nouvelles espèces au cours de la dernière décennie, des facteurs susceptibles de jouer un rôle important dans la modification de sa productivité globale, et sûrement déjà initiée.

Schéma synoptique de l'état du lac proposé pour 2022



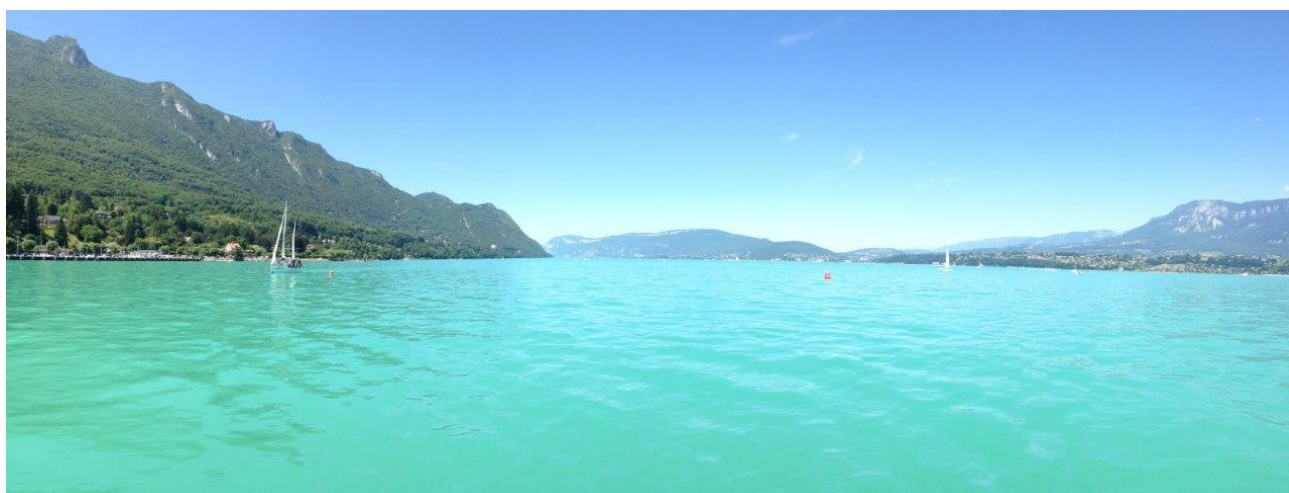
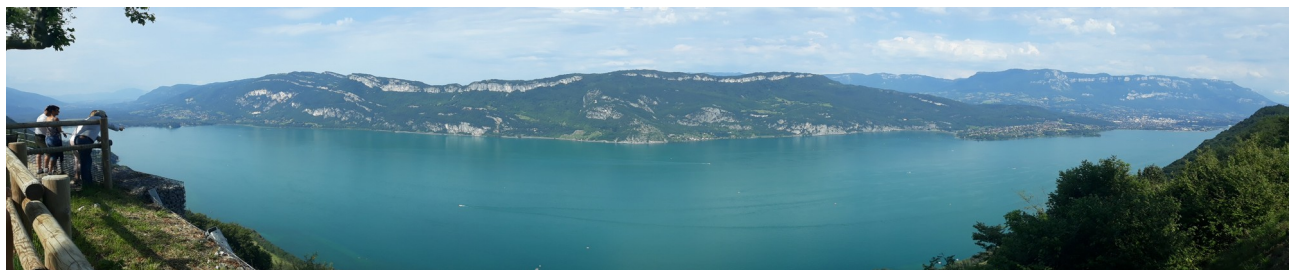
Classement d'état écologique suivant les critères DCE appliqués aux grands lacs péri-alpins

	Valeurs moyennes annuelles	
	Valeur pour être « Très Bon »	Valeur pour le lac en 2022
Secchi (m)	> 4,1	6,2
Nitrate ($\mu\text{g NO}_3/\text{L}$)	<1200	505
Ammonium ($\mu\text{g NH}_4^+/\text{L}$)	<74,2	8,3
Phosphore total ($\mu\text{gP}/\text{L}$)	<11	8,9
IPLAC	>0,8	0,65

Classement trophique suivant les critères OCDE

Trophic status	TP (median) (µg/l)	Chlorophyll a (median) (µg/l)	Chlorophyll a maxima (µg/l)	Secchi (median) (m)	Secchi minima (m)
Ultra-oligotrophe	≤4	<1	<2.5	>12	>6
	≤10	<2.5	2.5-8	>6	>3
Oligotrophe	8,9	2,3	4,2	6,2	
Mesotrophe					3,0*
	10-35	2.5-8	8-25	6-3	3-1.5
Eutrophe	35-100	8-25	25-75	3-1.5	1.5-0.7
Hyper-eutrophe	≥100	>25	>75	<1.5	<0.7

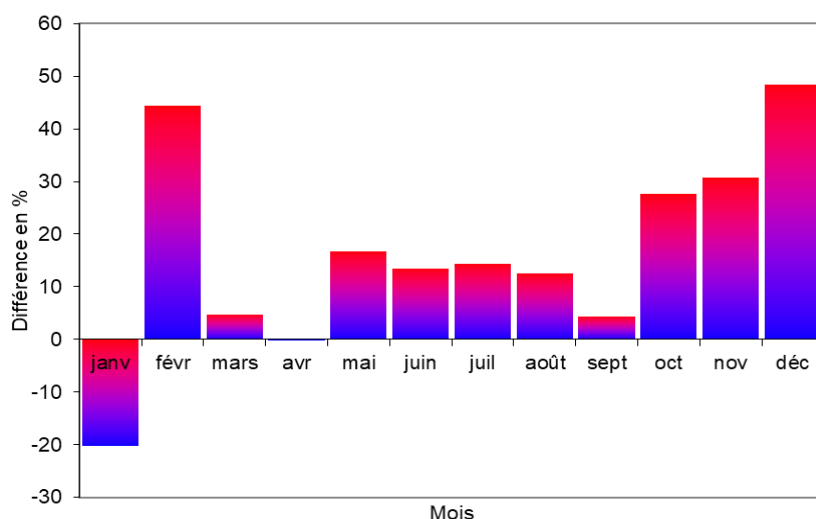
* Eaux turquoises



CE QU'IL FAUT RETENIR POUR L'ANNÉE 2022

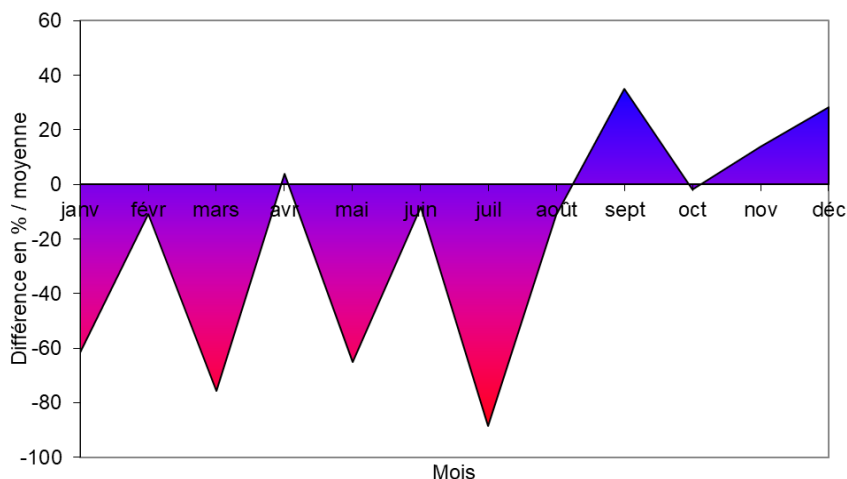
Les 20 **campagnes** de terrain prévues en 2022 ont pu être réalisées.

Avec une **température moyenne annuelle de 13,6°C**, valeur supérieure de +1,7°C soit 14% par rapport à la moyenne 1990-2020 et de +2,1°C soit 15% de plus par rapport à la moyenne 1974-2020, l'année **2022 a été l'année la plus chaude** enregistrée au cours des précédentes décennies et s'inscrit dans la lignée des années qui confirment le réchauffement global enregistré autour du lac. Seul le mois de janvier a présenté une température moyenne inférieure à la moyenne 1990-2022 (de -20%), tous les autres mois de l'année arborant des températures mensuelles égales ou supérieures à la moyenne, entre 0% en février et +48% en décembre.



A 2 m de profondeur, seul l'hiver 2022 a été plus froid que celui de l'année 2021. En dehors de cette période, les températures en 2022 ont été plus élevées que l'année 2021 pour tout le reste de l'année. La différence de température a été jusqu'à +5,5°C pour la fin d'avril. La température maximale a été de 25,02 °C le 28/07/2022, soit 1,46 °C de plus que l'année 2021. **Les eaux de surface ont donc été significativement plus chaudes en 2022 que les années précédentes**, avec une température moyenne annuelle à 2 m de 16,48°C, soit 1,53°C de plus que l'année 2021 et 0,87 °C de plus que l'année 2020. L'évolution interannuelle des températures moyennes continue de corroborer une **tendance nette du réchauffement des eaux de surface depuis 1984** (~13°C en 1984 vs >16°C en 2022). Comparativement, les **températures de la couche profonde n'ont pas révélé de tendance sur le long terme en terme de réchauffement**, mais il faut noter que, depuis 2012, la température de l'eau à 140 m montre une tendance d'augmentation, **les deux années les plus chaudes étant 2021 et 2022** avec une moyenne de 6,64°C et 6,5°C respectivement.

Avec une hauteur cumulée de **980 mm** de pluie à Voglans, l'année **2022 se situe en dessous de la moyenne** considérée sur la période 1974-2020 ou 1990-2020 (soit une valeur autour de 1 190 mm). Des précipitations excédentaires ont surtout été enregistrées en septembre et décembre (respectivement +35% et +28% par rapport à la moyenne 1990-2020) et de manière moins marquée en avril (+4%) et novembre (+14%). Les autres mois ont été déficitaires (respectivement -62% en janvier, -11% en février, -76% en mars, -65% en mai, -8% en juin, -88% en juillet, -11% en août, et -2% en octobre). L'année **2022** a donc été marquée par **des périodes contrastées** (comme les années précédentes), caractérisée par **quelques mois pluvieux mais surtout des mois très secs**.



L'hydrologie de la **Leysse** en **2022** a été marquée par un **débit moyen très inférieur** au module interannuel (>20%). Les débits instantanés ont été **inférieurs au module durant 284 jours** (vs 242 jours en 2021). De plus, les débits ont été inférieurs au Q_{MNA5} durant 100 jours (vs 59 jours en 2021) et au débit minimum biologique pendant 59 jours (vs 48 jours en 2021 et 2020).

		Source DREAL sur 55 ans		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
		Q_{MNA5}	Module															
Moyenne annuelle	m ³ /s	0,72	6,22	6	3,5	5,25	3,78	6,55	9,17	6,32	6,3	6,77	4,29	7,31	6,22	5,86	6,28	4,9
Q < module inter annuel	jours			244	307	287	311	277	177	243	223	223	304	233	240	240	242	284
Q < Q_{MNA5} inter annuel	jours			0	51	15	0	0	0	0	0	9	48	70	38	58	59	100

Le **débit moyen annuel** en **2022** du **Sierroz** a également été **significativement inférieur** au module (>40%). Les débits instantanés ont été **inférieurs au module durant 299 jours** (vs 265 jours en 2021) et inférieurs au Q_{MNA5} durant 81 jours (vs 1,5 jour en 2021). Enfin, le débit minimum biologique a été atteint pendant 69 jours (vs 7,5 jours en 2021).

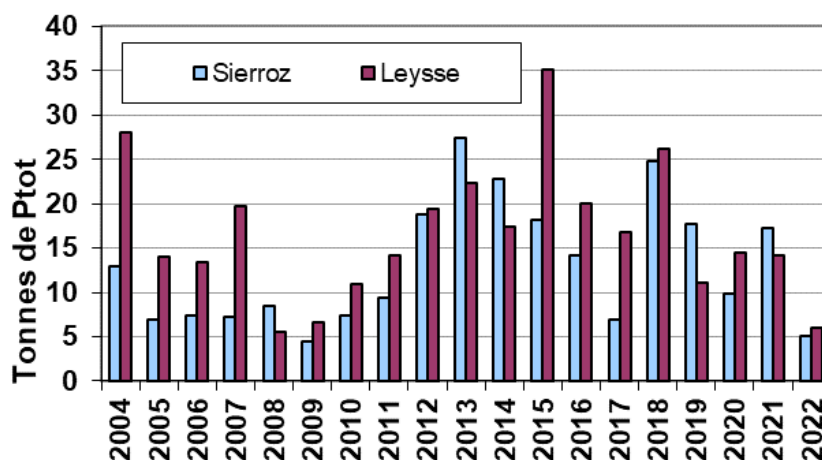
		Source DREAL sur 55 ans		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
		Q _{MNAS}	Module															
Moyenne annuelle	m ³ /s	0,23	2,43	2,4	1,5	1,9	1,3	2,6	3,3	2,8	1,89	2,69	1,34	2,57	2,25	1,79	2,23	1,42
Q < module inter annuel	jours			241	301	275	319	256	135	232	183	227	308	192	272	290	265	299
Q < Q _{MNAS} inter annuel	jours			0	82	15	1,5	25	0	26	20	13	16	73	28	8	1,5	81

Le Phosphore présent dans le lac a 3 origines potentielles : les apports des rivières du bassin versant (ruissellement urbain, érosion des sols, stock sédimentaire), les rejets directs (réseaux d'eaux pluviales, déversoirs d'orage d'Aix-les-Bains) et les apports internes (processus complexe de relargage par les sédiments du fond du lac). Avant 2004 et la mise en place de deux stations de prélèvement en continu, l'une sur la Leysse et l'autre sur le Sierroz (les principaux tributaires du lac), les apports en nutriments au lac faisaient l'objet d'une estimation. Depuis cette date, ces apports sont quantifiés par des analyses par temps sec et de temps de pluie avec une fréquence qui a été recentrée lors des épisodes de pluie ces dernières années. Les sources de nutriments en provenance des déversoirs d'orage (DO) des systèmes d'assainissement de Grand Chambéry et Grand Lac font également l'objet de suivis réglementaires. **Depuis 2004, les apports en P_{tot} au lac (mesurés sur eau brute) ont varié entre 11 et 57 tonnes/an** contre ~100 T/an dans les années 1990 et ~300 T/an dans les années 1970. Le fait que les apports en MES présentent des variations similaires depuis 2004, abonde dans le sens d'une prédominance du P particulaire dans les apports. **Le bilan des principaux apports au lac en nutriments (en tonnes de P et N)** est résumé dans le tableau ci-dessous.

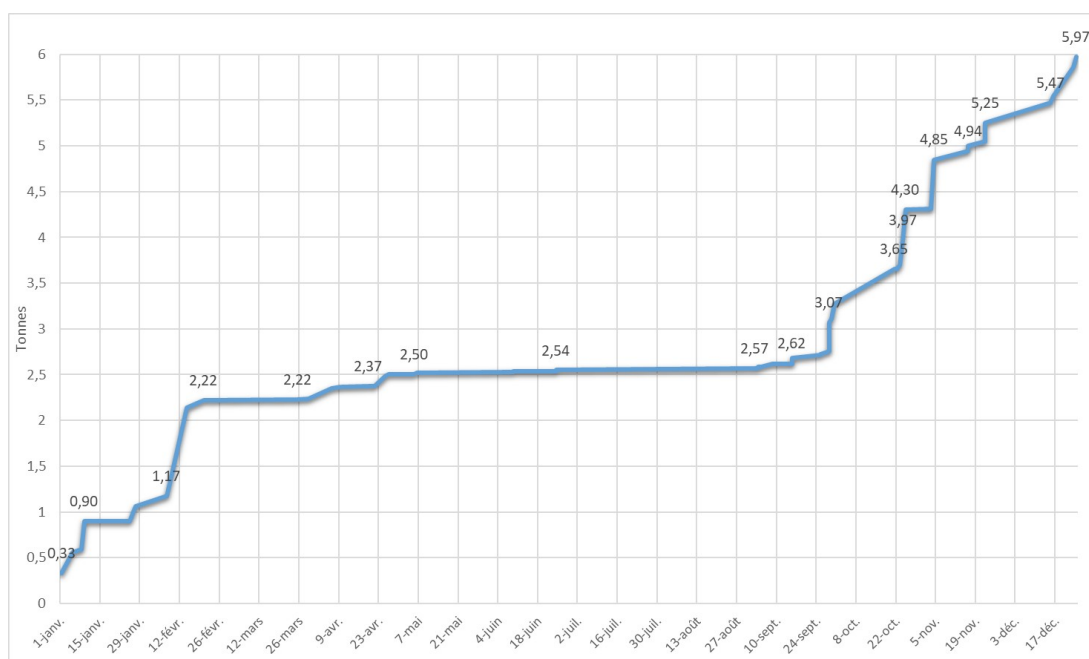
	1974	1983	1995-1996	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
P _{tot} (Leysse et Sierroz)	300	150	94	27	14	11	18	24	38	50	40	53,4	31,9	26,3	51	28,8	24,4	31,5	11,1
				5,8	4,2	2,7	2,4	2,8	2,3	2,8	2,1	3,7	2,5	2,4	5,1	2,4	1,41	0,33	
PO ₄	140		18	4,6	3	1,82	1,89	1,5	3,1	4	4,1	2,53	2,9	2,29	3,7	3,4	0,34	1,81	1,24
NO ₃	1,5	580	450	367	290	214	309	181	347	409	275	275	264	202	302	324	259	284	217
NO ₃ + NKT				617	516	334	454	360	654	704	503	510	462	378	544	538	396	469	338

Après des années de faibles apports en nutriments entre 2007 et 2011, les années 2012 à 2015 ont été marquées par une hausse de ces apports. La baisse amorcée à nouveau en 2017 (avec 28,7 T) a été confirmée en 2019 et 2021 (avec 31,2 et 31,8 T) malgré une forte hausse en 2018 (56,1 T). Avec un apport global des deux principaux tributaires (Leysse et Sierroz) estimé à 25,8 T de Phosphore total, l'année 2020 avait présenté la valeur la plus basse de la dernière décennie en passant significativement sous le seuil critique des 30 T, limite théorique édictée par le comité scientifique pour permettre une réologotrophisation durable. Les apports étant principalement constitués de P particulaire peu ou pas biodisponible, cette référence reste symbolique et peut encore faire l'objet d'une réflexion. Quoi qu'il en soit, **en 2022, les apports ont été les plus bas jamais enregistrés avec 11,1 T**. Le canal de Savières en apportant ~0,2 T de P_{tot} au lac n'a donc été responsable que de <2% des apports totaux en 2022. Etant donné la

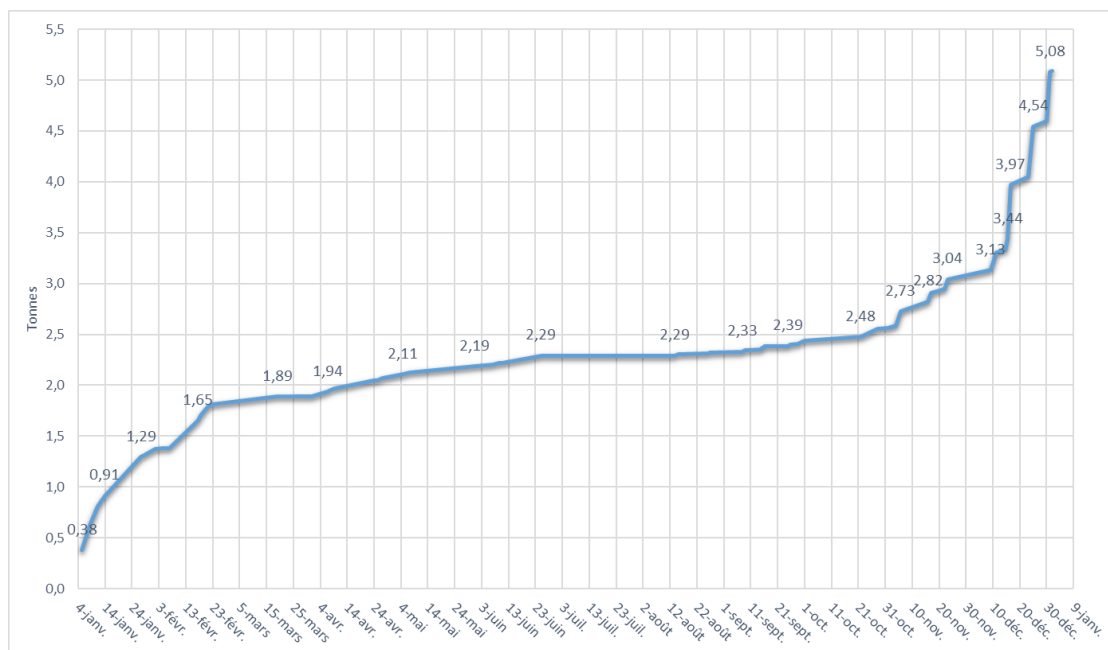
dynamique des échanges entre le lac et le canal de Savières, il est probable que le P exporté soit majoritairement sous forme dissoute potentiellement plus biodisponible. Cette différence majeure n'a pas fait l'objet à ce jour d'une évaluation approfondie quant aux conséquences sur l'eutrophisation.



Le volume d'eau total transité en 2022 par la Leysse et le Sierroz a été d'~200 Mm³ (vs 269 Mm³ en 2021). Bien que faibles en 2022, **le temps de pluie et plus particulièrement les crues ont encore joué un rôle déterminant sur les apports au lac.** En effet, le temps de pluie a été à l'origine de 47 à 83% des apports de Ptot au lac. Pour la Leysse, les apports en temps de pluie au lac de Ptot ont été de 4,86 T (81%), à comparer avec les 11,1 T en 2021, 12,4 T en 2020, 9,76 T en 2019 et 26,2 T en 2018. La figure ci-dessus résume l'évolution des apports en Ptot cumulé via la Leysse au cours de l'année 2022, révélant les apports « marqués » de janvier à mi-février (2,2 T), suivis par une longue période de 224 jours sans crues représentatives avec un apport en Ptot de seulement 0,81 T, puis des crues moyennes et importantes d'octobre à décembre apportant 2,8 T de Ptot.



Les apports de Ptot en temps de pluie du Sierroz se sont élevés à 3,98 T en 2022 (vs 14,9 T en 2021, 8,3 T en 2020, 13,6 T en 2019 et 21,5 T en 2018). Comme pour la Leysse, trois périodes découpent l'année avec une période d'apport en Ptot de janvier à mi-février (1,65 T), suivie par 257 jours sans crues représentatives avec un apport en Ptot de seulement 0,83 T et finalement des crues moyennes et importantes de novembre à décembre avec 2,6 T de Ptot.



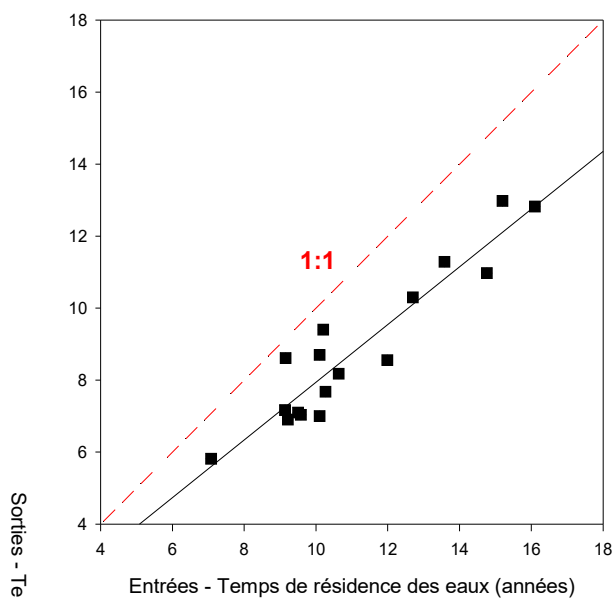
De façon générale, les concentrations en éléments restent plus élevées dans le Sierroz que dans la Leysse.

- La concentration en Ptot de 0,058 mg L⁻¹ sur la Leysse correspond à la moyenne des 10 dernières années (0,08 mg L⁻¹). Pour le Sierroz, la valeur de 0,108 mg L⁻¹ fait partie des valeurs les plus basses jamais enregistrées depuis 2010 (0,123 mg L⁻¹)
- Pour la Leysse et le Sierroz, les concentrations en PO₄ sont les plus basses jamais enregistrées, avec respectivement 0,005 et 0,007 mg L⁻¹
- Pour la Leysse, la concentration en nitrates est dans la moyenne des 13 dernières années avec 1,1 mg L⁻¹. Pour le Sierroz, la concentration de 1,05 mg/l est la plus basse jamais enregistrée
- Avec 0,027 mg L⁻¹, la Leysse présente des concentrations en NH₄ dans la moyenne des 5 dernières années. Après une baisse en 2021, le Sierroz, obtient une valeur haute et équivalente à la moyenne 2018, 2019 et 2020 avec 0,122 mg L⁻¹
- Les concentrations en MES de la Leysse et du Sierroz sont les plus basses enregistrées avec, respectivement, 171 et 156 mg L⁻¹

Depuis 2006, l'estimation du **temps de résidence des eaux du lac du Bourget** peut être donnée de manière assez précise. Le tableau ci-dessous résume les valeurs données en années de ce temps de

résidence suivant que le calcul est fait en tenant compte des entrées (tributaires, précipitations) ou des sorties (exutoire, évaporation, pompages) du lac (sources CISALB, CNR). On constate que ce temps de résidence peut fluctuer de manière très importante d'une année sur l'autre, notamment avec la quantité des apports dont l'importance varie fortement d'une année à l'autre. La relation entre « entrées » et « sorties » est une relation linéaire hautement significative ($r=0,92$, $n=17$) mais l'estimation effectuée à partir des « entrées » est toujours supérieure à celle des « sorties », de 0,5 an (minimum observé en 2007) à 3,8 ans (maximum observé en 2017) avec une moyenne de 2,1 ans, ce qui suggère une sur-estimation des entrées et/ou une sous-estimation des sorties. **2022 est parfaitement dans la moyenne d'un temps de résidence des eaux aux alentours de 11 ans avec pour l'entrée et la sortie une estimation de 12,7 et 10,3 ans respectivement.** Dans le calcul du temps de résidence, les valeurs les plus incertaines sont celles de l'évapo-transpiration (qui intervient dans le calcul des sorties) mais aussi des précipitations (qui intervient dans le calcul des entrées) sur le lac qui peuvent être hétérogènes d'un endroit à un autre. L'évapo-transpiration est en effet un chiffre global à l'échelle de la Savoie alors que les précipitations correspondent au cumul annuel mesuré à la Station météo France de Voglans, située au sud du lac. Les volumes entrant et sortant sont comparativement relativement bien connus. Au final, et en dépit d'incertitudes sur certains paramètres, il est possible d'estimer que **le temps moyen de résidence des eaux dans le lac du Bourget varie entre 9 et 11 ans.**

Année	Entrée	Sortie	Différence
2006	13,6	11,3	2,3
2007	9,1	8,6	0,5
2008	10,3	7,7	2,6
2009	16,1	12,8	3,3
2010	12,0	8,6	3,4
2011	15,2	13,0	2,2
2012	9,2	6,9	2,3
2013	7,1	5,8	1,3
2014	9,6	7,0	2,5
2015	10,6	8,2	2,5
2016	9,1	7,2	2,0
2017	14,8	11,0	3,8
2018	6,3	7,1	-0,8
2019	10,1	8,7	1,4
2020	10,5	9,4	1,1
2021	10,1	7,0	3,1
2022	12,7	10,3	2,3
<i>minimum</i>	6,3	5,8	-0,8
<i>moyenne</i>	11,0	8,9	2,1
<i>maximum</i>	16,1	13,0	3,8



Depuis 1981, les valeurs de transparence indiquent une **augmentation de la transparence annuelle moyenne** (qui est passée de 3,6 m en 1982 à plus de 8 m en 2015) et estivale (qui est passée de 2,9 m en 1981 à 7,5 m en 2010) indiquant sur le long terme une nette amélioration de la qualité des eaux. En **2022**, les valeurs de **transparences moyennes annuelle et estivale ont été respectivement de 6,2 et 3,9 m** (vs respectivement 6,0 et 3,9 m en 2021, 7,3 m et 3,8 m en 2020, 6,7 m et 5,1 m en 2019, 5,5 m et 4,25 m en 2018, et 6,8 m et 6,6 m en 2017). Les dernières années avaient été marquées par l'absence d'une phase des eaux claires, exception faite de 2020. En 2022 comme en 2021 une telle phase ne semble pas avoir eu lieu.

Un des objectifs de la DCE était qu'en 2021 la concentration en P-PO₄ du lac du Bourget soit inférieure ou égale à 10 µg L⁻¹. Cette valeur a été atteinte pour la première fois en 2011 (avec 8 µg L⁻¹) et les années 2012 (avec 10 µg L⁻¹), 2013-2014 (avec 8 µg L⁻¹) et 2015 (6 µg L⁻¹) l'ont confirmé. Bien que plus élevé en 2016 avec 7-8 µg L⁻¹ le caractère oligo-mésotrophe (estimé sur la base de plusieurs paramètres) du lac a été confirmé en 2017 avec une concentration moyenne hivernale de PO₄ record <5 µg L⁻¹. Pour le phosphore total, la concentration moyenne hivernale avait été de 9 µg L⁻¹ (vs 12 µg L⁻¹ en 2016), soit la valeur la plus basse enregistrée sur la chronique. En 2018, ces valeurs étaient un peu « reparties » à la hausse avec 6 et 10 µgP L⁻¹ pour le PO₄ et le Ptot, respectivement, sûrement à mettre en lien avec les forts apports (des tributaires) enregistrés cette année là. **Les valeurs de Ptot et PO₄ en 2022, 2021 et 2020 ont été respectivement de 9,0 et 4,4 µg L⁻¹, 9,5 et 4,1 µg L⁻¹ et de 9,3 et 4,9 µg L⁻¹, 2019 conservant donc le record avec les concentrations les plus basses jamais enregistrées au point B, soit 3 et 7 µg L⁻¹ pour le PO₄ et le Ptot, respectivement.**

2022 est la **cinquième année consécutive** où la **concentration moyenne annuelle en chlorophylle a** sur la couche d'eau supérieure 0-18 m a été **inférieure ou égale à 3 µg L⁻¹**, soit en l'occurrence 2,3 µg L⁻¹ vs 2,74 (2021), 2,85 (2020), 2,95 (2019) et 2,9 (2018) µg L⁻¹; les années précédentes étant généralement aux alentours de 3,3 µg L⁻¹. La distribution interannuelle des concentrations moyennes de chlorophylle a est assez hétérogène, mais la tendance à la baisse depuis le démarrage de la chronique à la fin des années 1980, reste hautement significative, étant passée de ~8 µg L⁻¹ en 1984 à ~3-4 µg L⁻¹ depuis 2010 (année qui avait vu « disparaître » la cyanobactérie filamenteuse toxique *P. rubescens*). En 2022, **la valeur maximale de la concentration en chlorophylle a a aussi été la plus basse enregistrée** depuis le début de la chronique, avec 4,24 µg L⁻¹.

Entre 2016 et 2017, la **biomasse phytoplanctonique** avait été réduite de presque moitié, passant de 2 785 à 1 643 µg L⁻¹. Cette valeur qui avait encore baissé en 2018 avec 1 251 µg L⁻¹ était remontée un petit peu en 2019 avec 1 510 µg L⁻¹. En 2020, la biomasse du phytoplancton avait de nouveau réduit avec 1 323 µg L⁻¹ et 2021 a suivi cette tendance de manière significative avec 1 051 µg L⁻¹. **2022 voit remonter cette valeur à 1 243 µg L⁻¹ faute d'une structure en taille du phytoplancton voyant la progression du microphytoplancton.** Toutefois, le **picophytoplancton** [e.g. les picocyanobactéries seulement] atteignant **19,8% en 2022** vs 15% en 2021 et 17,3% en 2020 révèlent la progression attendue de ces petites formes (voir ci-après). L'évolution observée des différentes espèces dominantes rend l'interprétation difficile car celles-ci sont typiques de milieux de qualité différente, allant de l'oligotrophie (avec des espèces comme *Dinobryon divergens*, *D. sp*) à méso-eutrophe (comme la diatomée *Fragilaria crotonensis*). L'analyse de la dynamique des groupes fonctionnels confirme toutefois **l'amélioration générale du niveau trophique du lac sur le long terme**, avec une proportion des taxons appartenant aux groupes fonctionnels indicateurs de milieux oligotrophes depuis 2009 qui reste relativement élevée. D'ailleurs, les **indices de Brettum (4,06) et l'IPLac (0,65) restent bons, bien qu'inférieurs à ceux de 2021 qui ont été les plus élevés de la chronique.**

Les **picocyanobactéries** constituent un compartiment biologique fortement dynamique pouvant atteindre de fortes concentrations. Depuis le début de la chronique, on observe une **augmentation faible mais significative de la biomasse de ce compartiment et de sa contribution à l'ensemble de la biomasse phytoplanctonique**. En 2020, on avait enregistré la plus haute proportion moyenne annuelle relative de ce groupe à l'ensemble en terme de biomasse (avec 17,3%) et 2021 conservait une proportion élevée avec 15,7%. **2022 signe donc un nouveau record avec ~20%**, ce qui continue de suggérer le caractère bio-indicateur de ce compartiment en lien avec la réoligotrophisation du lac du Bourget et la relation négative avec la ressource phosphorée mais peut être aussi une réponse à l'augmentation des températures des eaux de surface au cours de la dernière décennie.

Si la **dynamique du zooplancton** a reproduit globalement celle des années précédentes, elle a été une nouvelle fois **remarquable en 2022**. Les **espèces herbivores** (e.g. les cladocères *Daphnia longispina*, *Eubosmina longispina* et *Diaphanosoma brachyurum*, le calanoïde *E. gracilis* et les nauplii des cyclopoïdes) ont constitué une **partie importante de la communauté totale zooplanctonique**, représentant en moyenne 63% des effectifs totaux, prépondérants au printemps. Leur dynamique a été fortement liée à la communauté phytoplanctonique et à la disponibilité d'espèces constituant une ressource nutritionnelle adéquate au développement et à la reproduction des consommateurs. Le suivi du **biovolume sédimenté** a confirmé une **tendance à la baisse depuis 2019**, la moyenne annuelle étant de 112 ml m⁻² en 2015 vs 49 ml m⁻² en 2019 et 51 ml m⁻² en 2022. L'abondance moyenne annuelle du zooplancton crustacéen montre donc une tendance à la baisse depuis le début du suivi, à mettre surtout en lien avec la **baisse des cladocères** au cours de ces dernières années **mais aussi des calanoïdes** plus récemment, la période printannière étant particulièrement critique. L'analyse des indices fonctionnels sur la période 2004-2022 a confirmé l'importance de la disponibilité des ressources nutritionnelles de bonne qualité (Diatomées et Chrysophycées) pour le maintien de l'efficacité trophique au sein du réseau pélagique. La disponibilité de ressources adéquates permet la prolifération des espèces diversifiées et un transfert efficace vers les niveaux supérieurs.

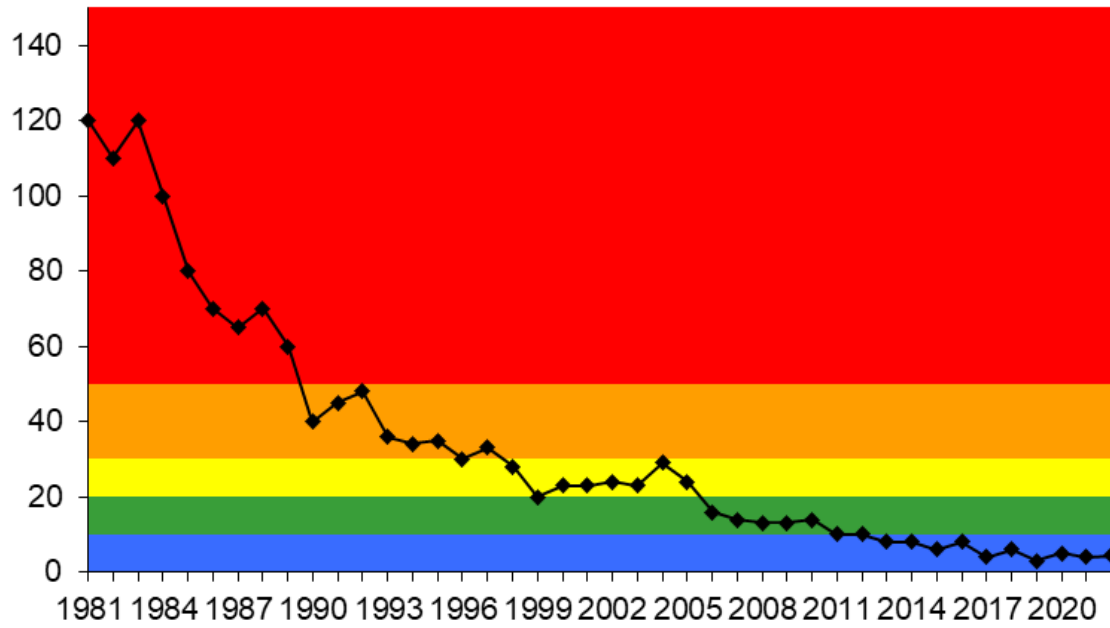
La diversité piscicole du lac continue d'être assez stable, même si les espèces difficilement capturables par les filets comme la blennie fluviatile (*Salaria fluviatilis*) ou peu abondantes comme la vandoise (*Leuciscus leuciscus*) et l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) n'ont pas été capturées en 2022. Les **densités acoustiques** pour le **corégone** sont à des **niveaux hauts** et cette **forte abondance** est confirmée par des CPUE numériques scientifiques hautes dans les filets pélagiques et benthiques. Cependant, **la baisse des captures de ce poisson se poursuit chez les pêcheurs professionnels** et indique que ces individus ne sont pas encore « rentrés » dans la pêche. Parmi les raisons, la baisse du poids moyen et du nombre d'individus de grande taille, à mettre en relation avec la baisse de la quantité de proies zooplanctoniques au printemps et une plus forte compétition intraspécifique. Le **silure confirme qu'il est bien installé** en progressant et occupant la 3^{ème} place en termes de rendement en termes de biomasse, alors que le poisson chat n'est pas détecté. La **perche est à des niveaux élevés dans les filets benthiques** mais caractérisée par des **densités faibles en acoustique et dans les filets pélagiques**, sa distribution étant donc majoritairement littorale. *In fine*, **2022** peut se résumer par (i) des niveaux

importants de coréogones estimés par hydroacoustique et dans les pêches scientifiques aux filets, mais par des individus de petite taille révélant des ralentissements de croissance modifiant fortement les rendements de captures des pêcheurs ; (ii) une population de perche caractérisée par un niveau très faible et une distribution presque exclusivement benthique des juvéniles de l'année, indiquant un faible recrutement ou une mortalité des juvéniles par la pêche ; (iii) la confirmation de l'absence de sandre depuis 2019 ; (iv) l'absence de poissons chats, et (v) la poursuite de l'augmentation du nombre de silures.

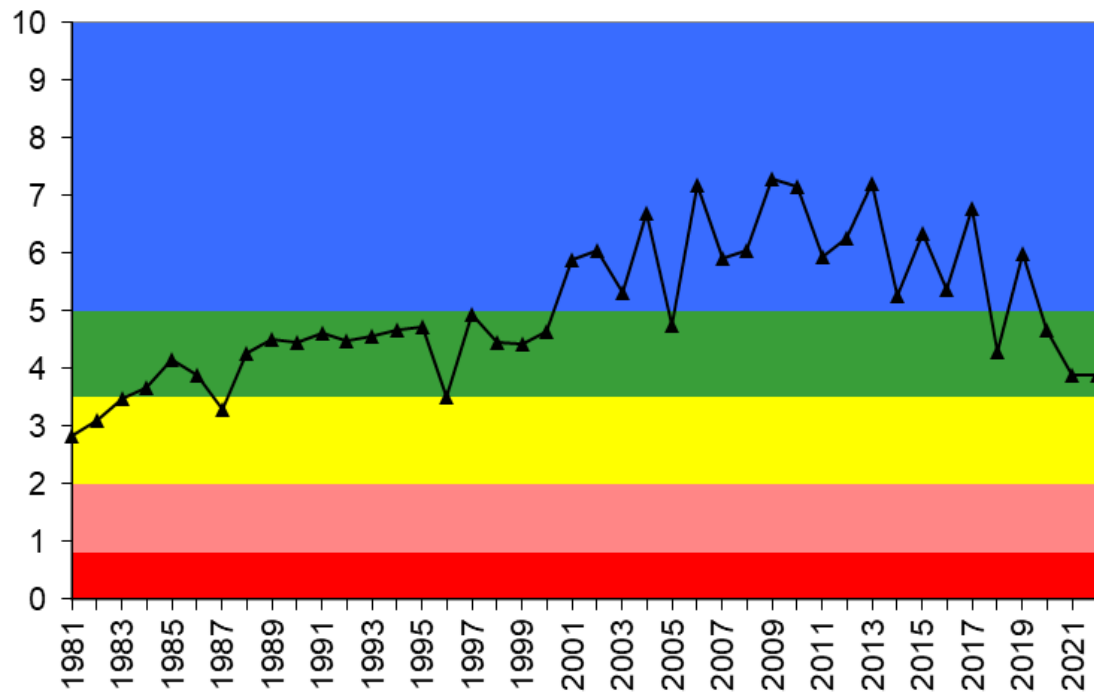
En 2022, le **compartiment macrobenthique** a été examiné révélant que le lac du Bourget présente un IBL de 15,2/20, une note en légère baisse par rapport aux années précédentes et principalement dûe à une diminution de la productivité littorale qui reste toutefois relativement importante. **La qualité de la faune littorale du lac apparaît très bonne** avec la présence notable d'*Ephemera* sp. dans 9% des échantillons. Il est noté toutefois que, comme les années précédentes, **les conditions environnementales restent contraignantes en zone profonde** probablement en lien avec la **désoxygénation des eaux de fond** observées chaque année. Le maintien de cette désoxygénation malgré la réoligotrophisation du lac suggère le maintien d'une accumulation de la matière organique au niveau des sédiments limitant le développement de la macrofaune benthique pour une surface non négligeable du lac. Enfin, l'observation pour la première fois dans le suivi de la **moûle quagga** et plus généralement l'abondance des *Dreissena* sp dans les relevés, montre la forte installation de ces espèces exotiques envahissantes (EEE). **Cette espèce, comme d'autres EEE récemment installées dans le lac du Bourget (e.g. *Hemimysis anomala*) pourrait peut-être expliquée en partie la baisse notable de l'abondance du zooplancton ces dernières années.**

Remerciements spécifiques : Jean-Claude Raymond et l'OFB (Unité Spécialisée Milieux Lacustres) pour la participation à l'étude du compartiment piscicole ; Emmanuel Naffrechoux (président du conseil scientifique) pour sa relecture critique de cette synthèse.

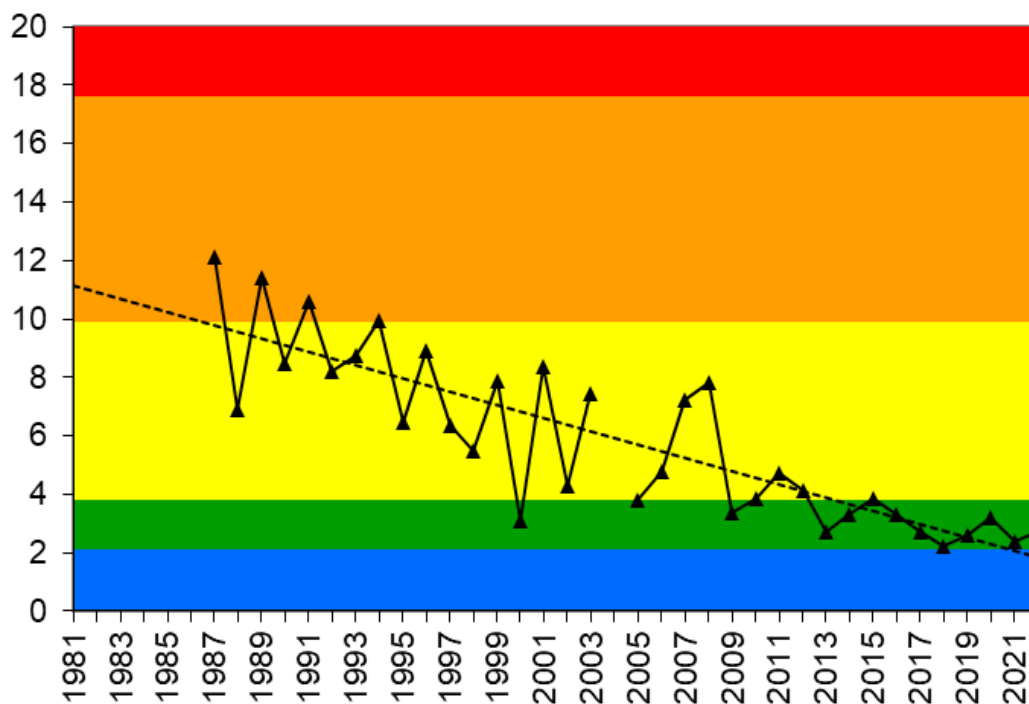
Concentrations en orthophosphates exprimée en $\mu\text{gP L}^{-1}$



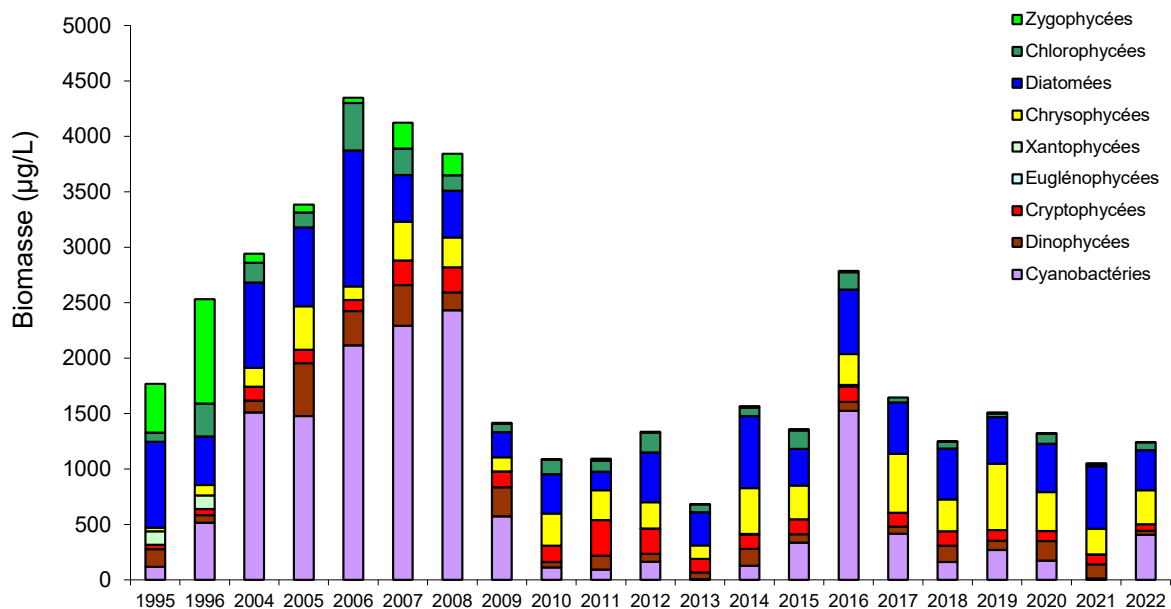
Transparence moyenne estivale exprimée en m



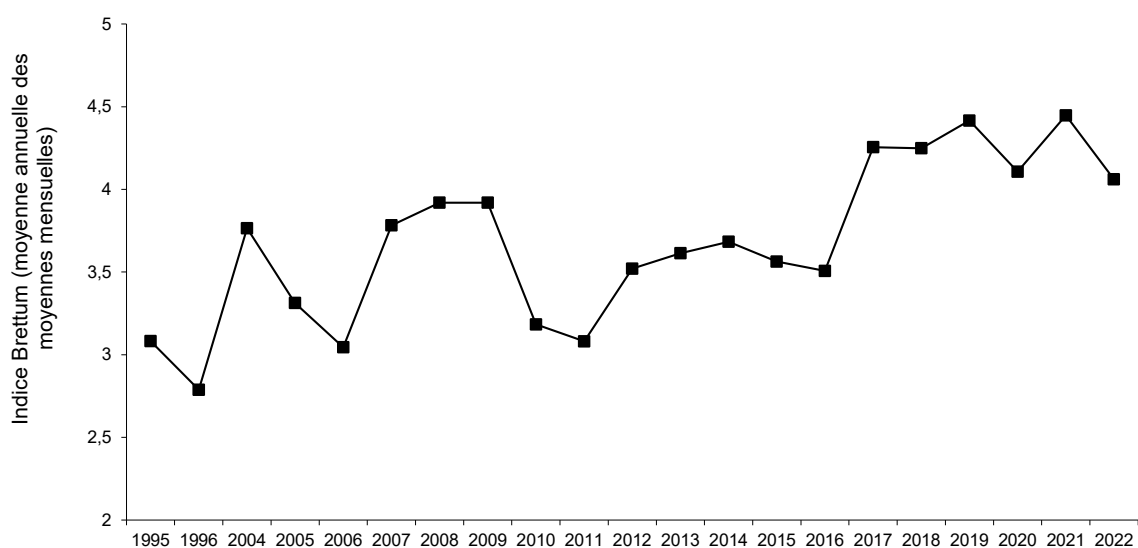
Concentration moyenne estivale de la chlorophylle a exprimée en $\mu\text{g L}^{-1}$



Biomasse annuelle moyenne du phytoplancton en $\mu\text{g L}^{-1}$



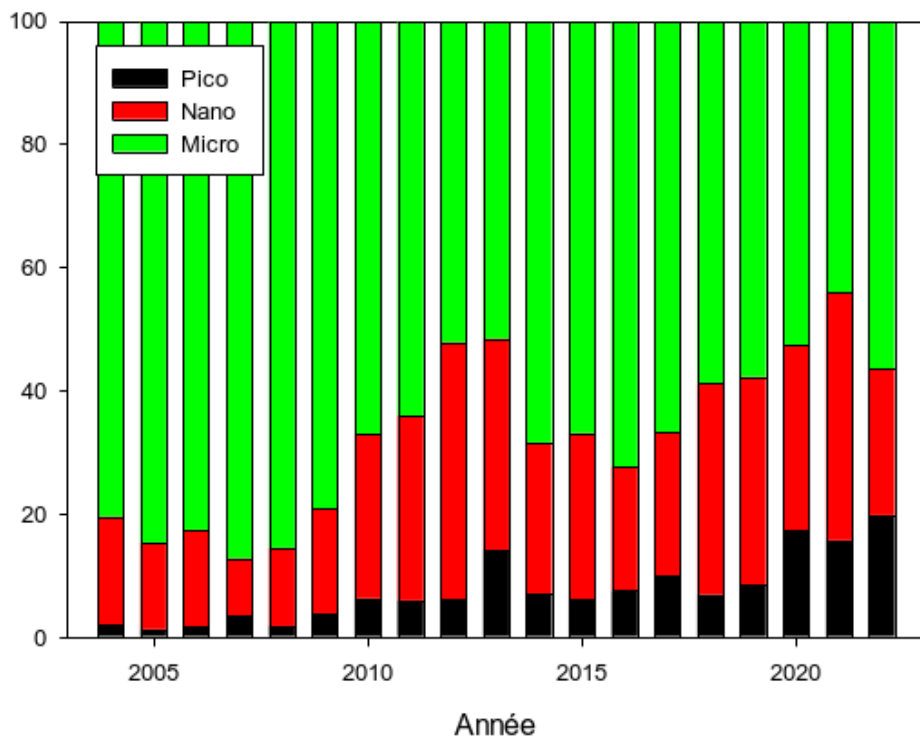
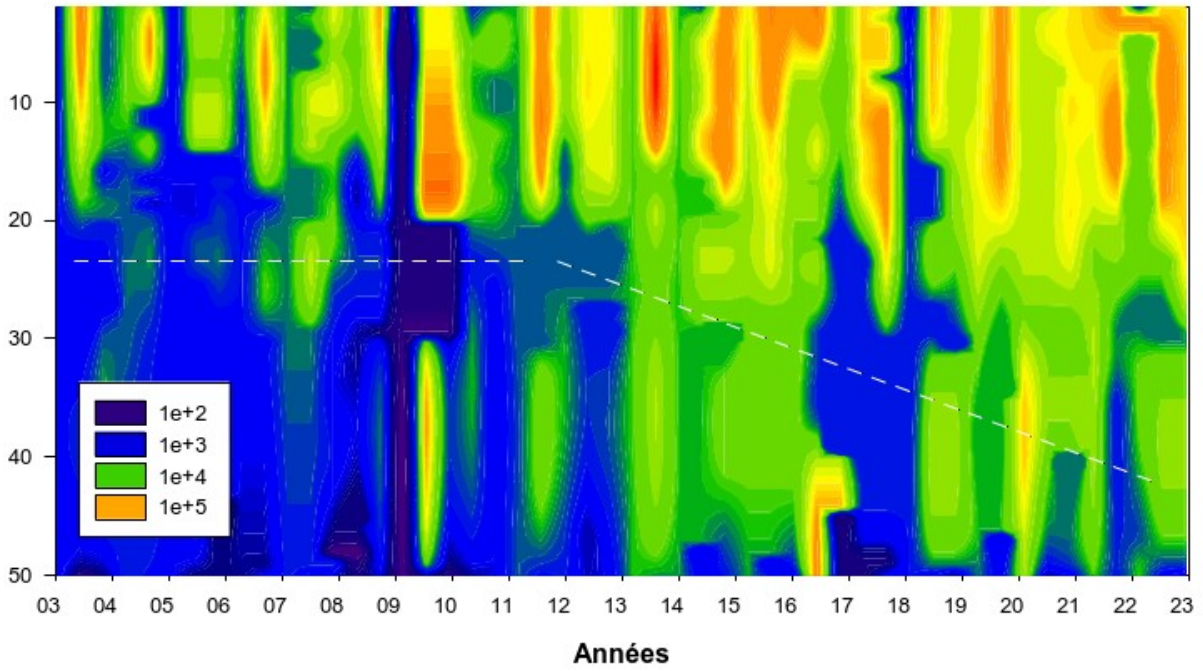
Evolution de l'inde de Brettum



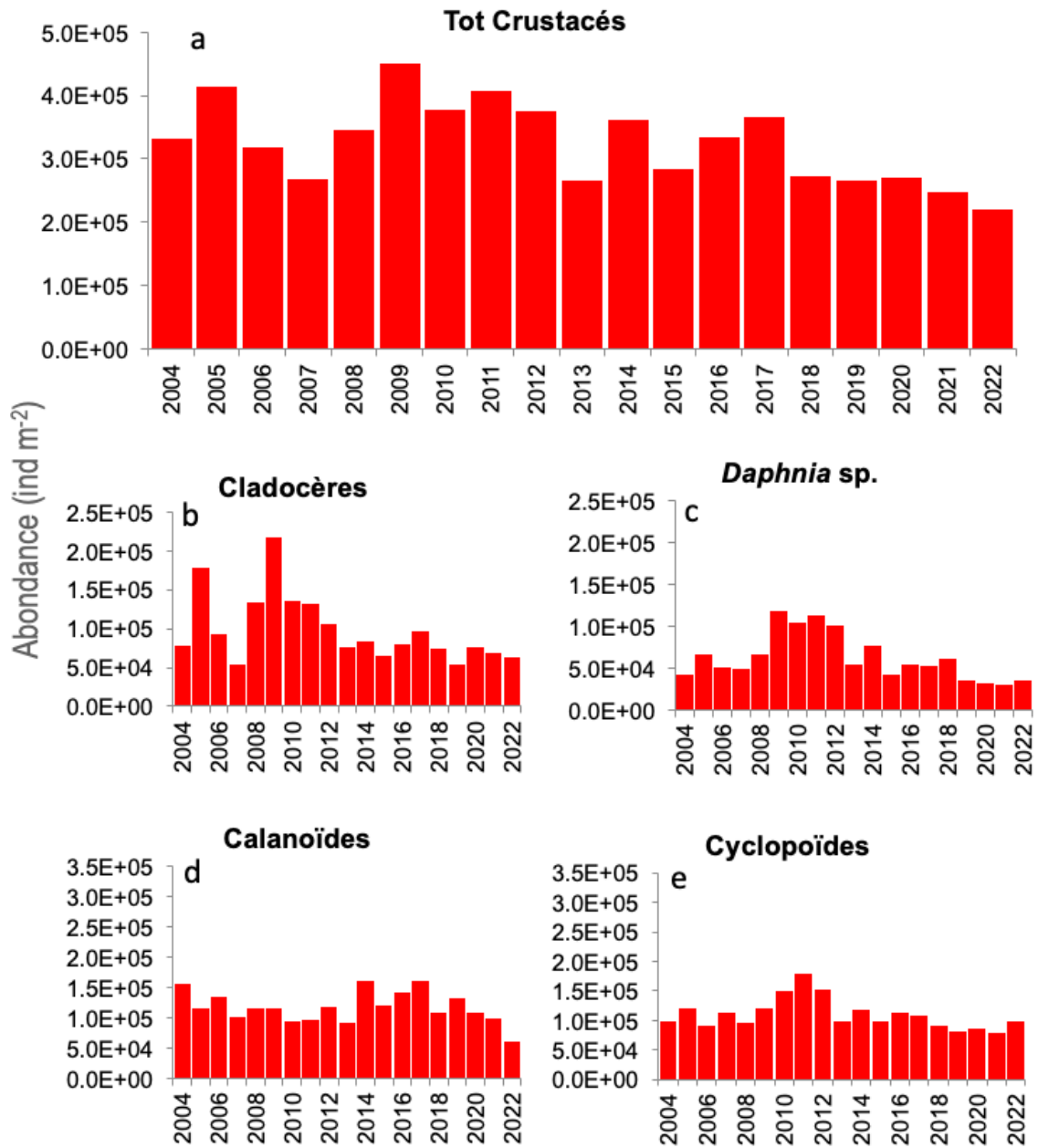
Evolution de l'IPLAC

Année	IPLAC	Classe d'état IPLAC
2004	0,672	Bon
2005	0,624	Bon
2006	0,553	Moyen
2007	0,633	Bon
2008	0,537	Moyen
2009	0,637	Bon
2010	0,629	Bon
2011	0,633	Bon
2012	0,617	Bon
2013	0,654	Bon
2014	0,623	Bon
2015	0,570	Moyen
2016	0,627	Bon
2017	0,740	Bon
2018	0,717	Bon
2019	0,735	Bon
2020	0,698	Bon
2021	0,778	Bon
2022	0,649	Bon

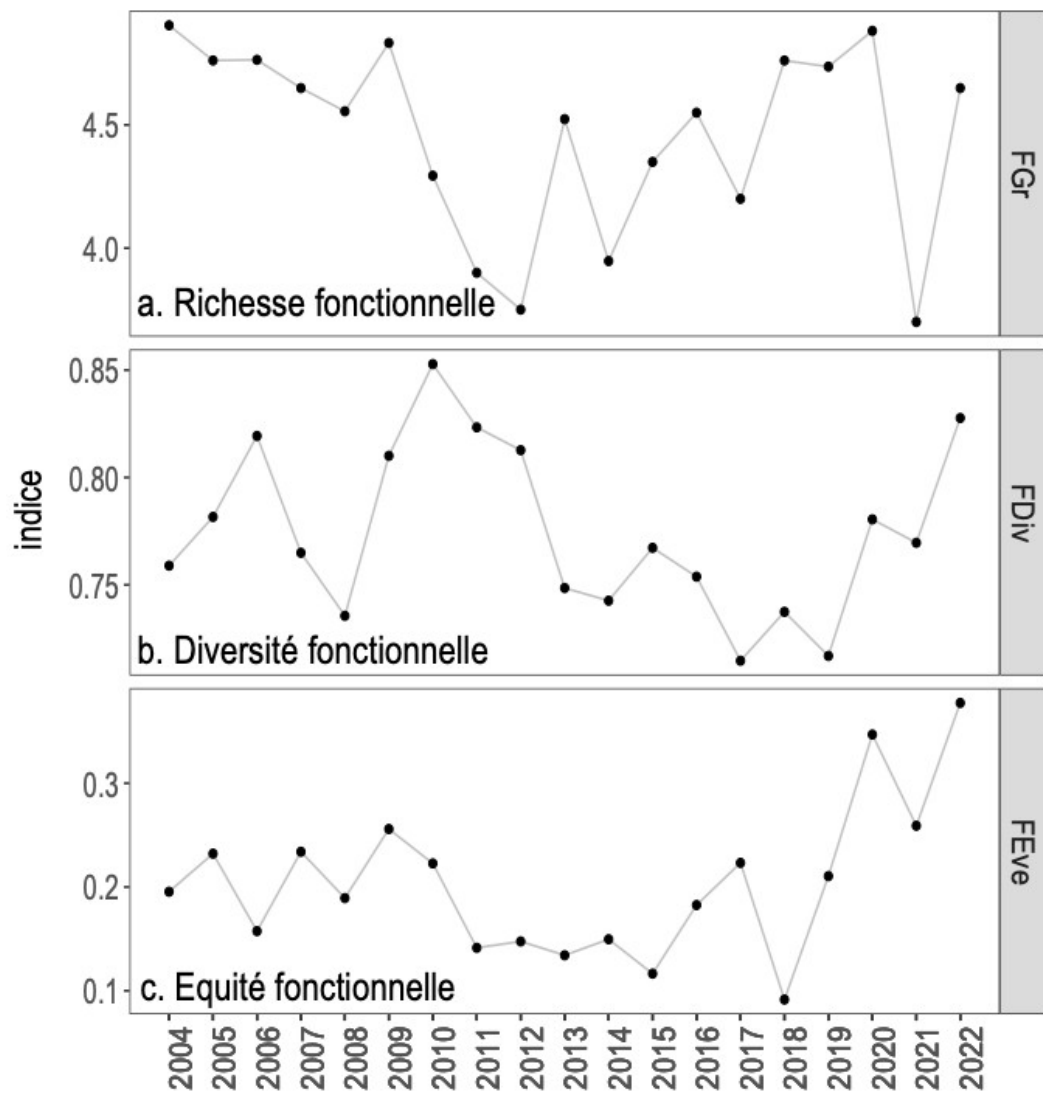
Abondances cellulaires des picocyanobactéries en nombre de cellules mL⁻¹ et biomasse relative du pico-, nano- et microphytoplancton en %



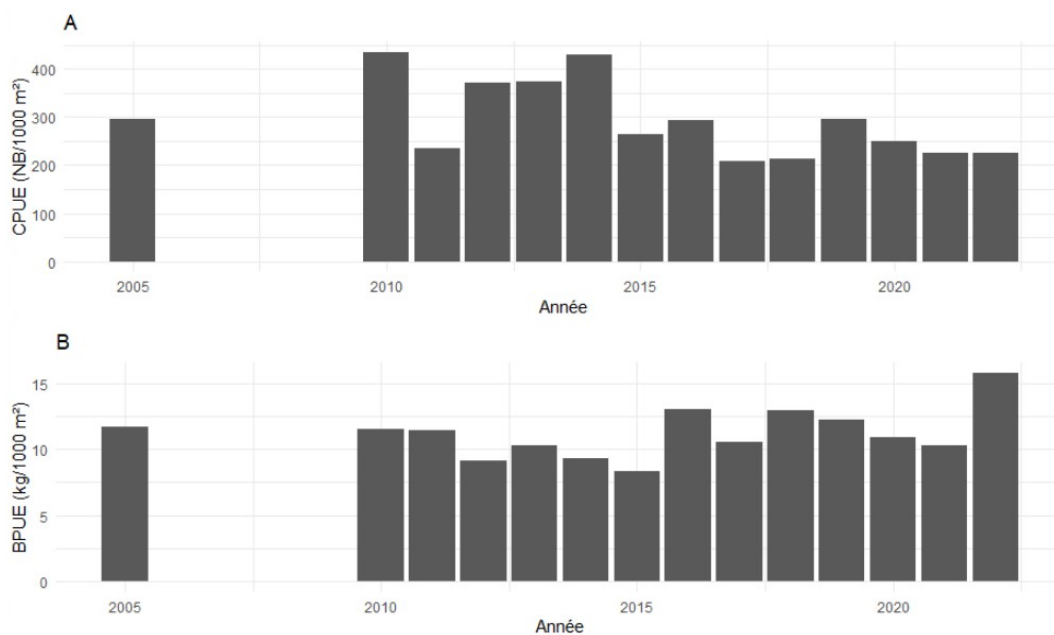
Abondances moyennes annuelles des microcrustacés, calanoides, cyclopoïdes, cladocères dont daphnies



Indices fonctionnels appliqués au compartiment zooplanctonique



CPUE (numériques NB/1000 m²) et BPUE (pondéral, kg/1000m²) pour l'ensemble des espèces et des filets issus de la pêche scientifique



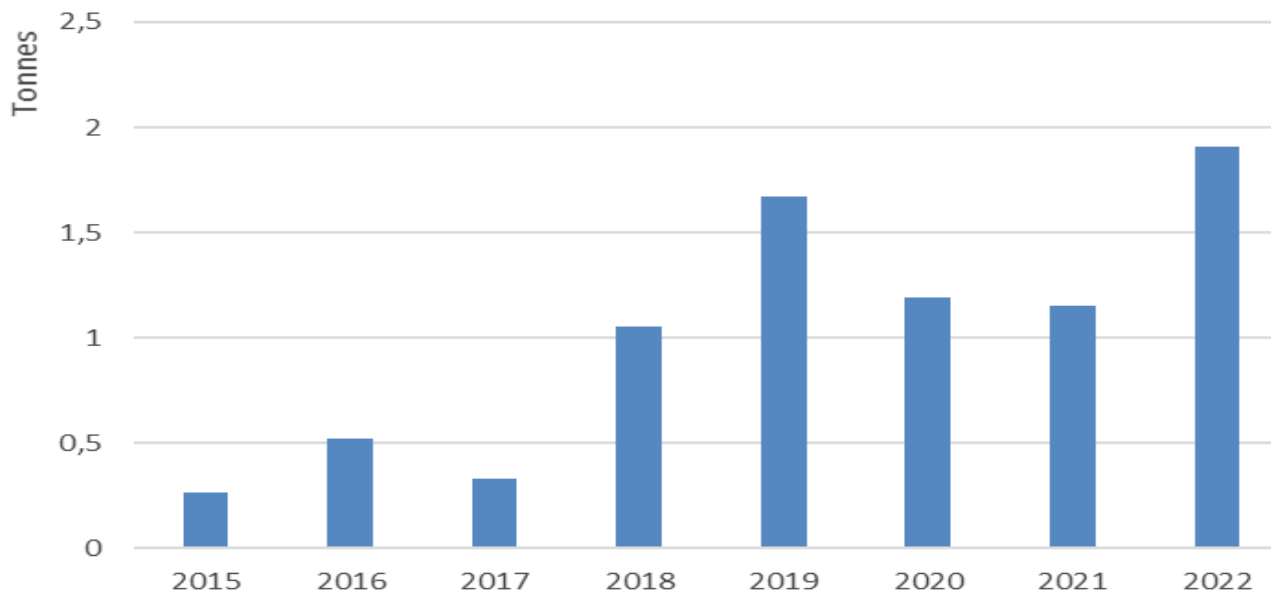
CPUE numériques (Nb/1000 m²) des filets benthiques et pélagiques pour A) corégone, B) le gardon et C) le perche



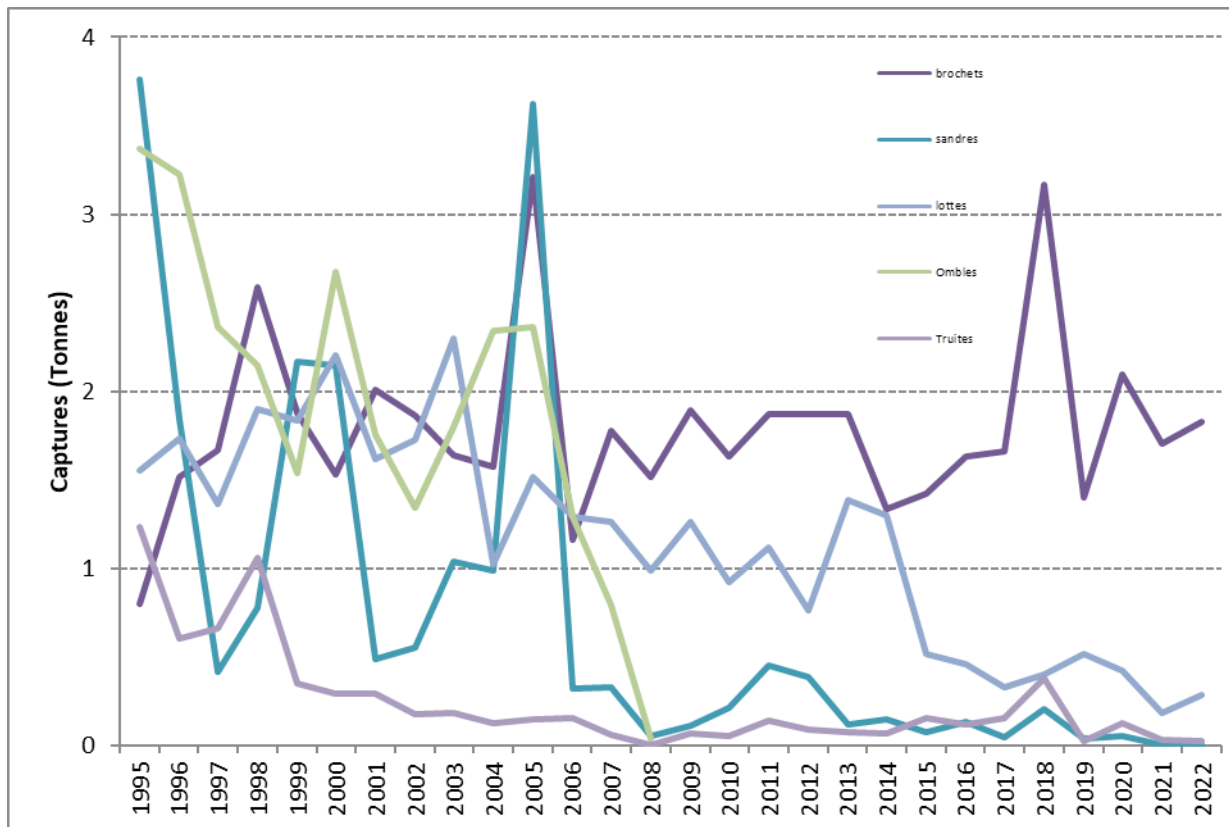
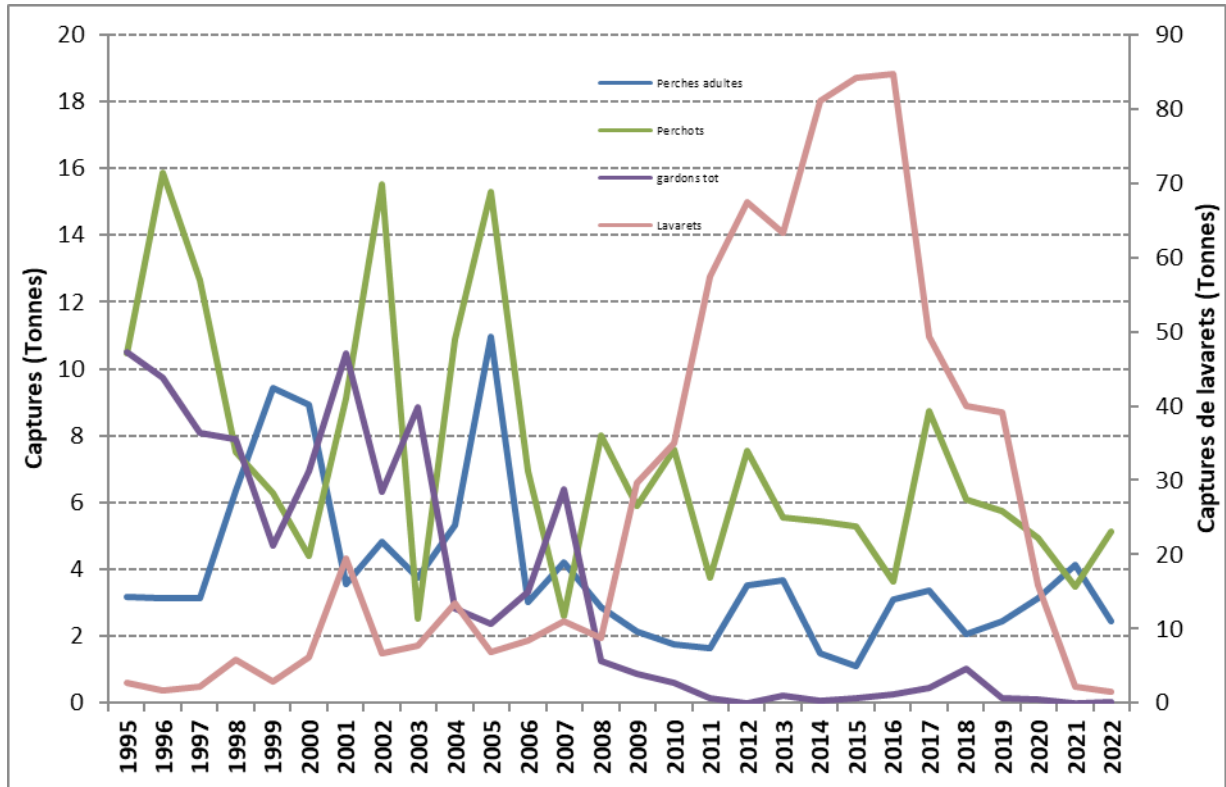
CPUE numériques des adultes (rouge) et des juvéniles (en bleu) pour les corégones, les perches et les gardons



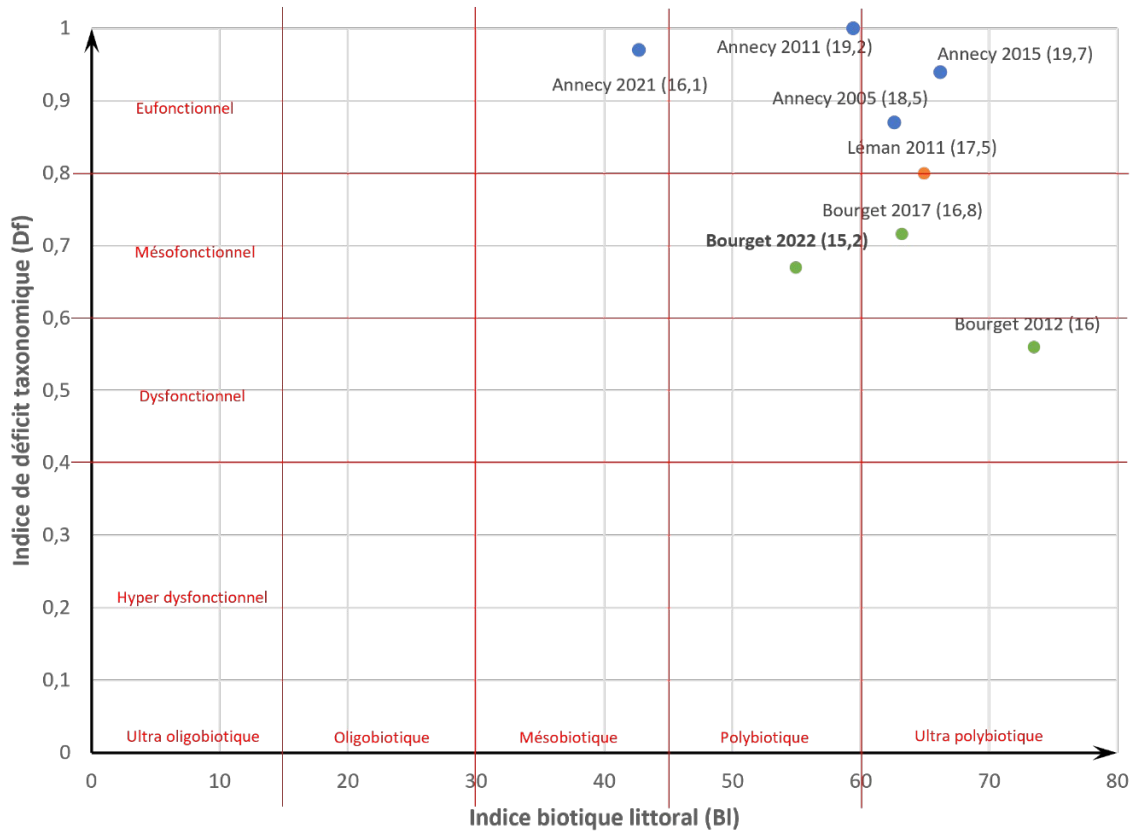
Evolution des captures de silure depuis 2015



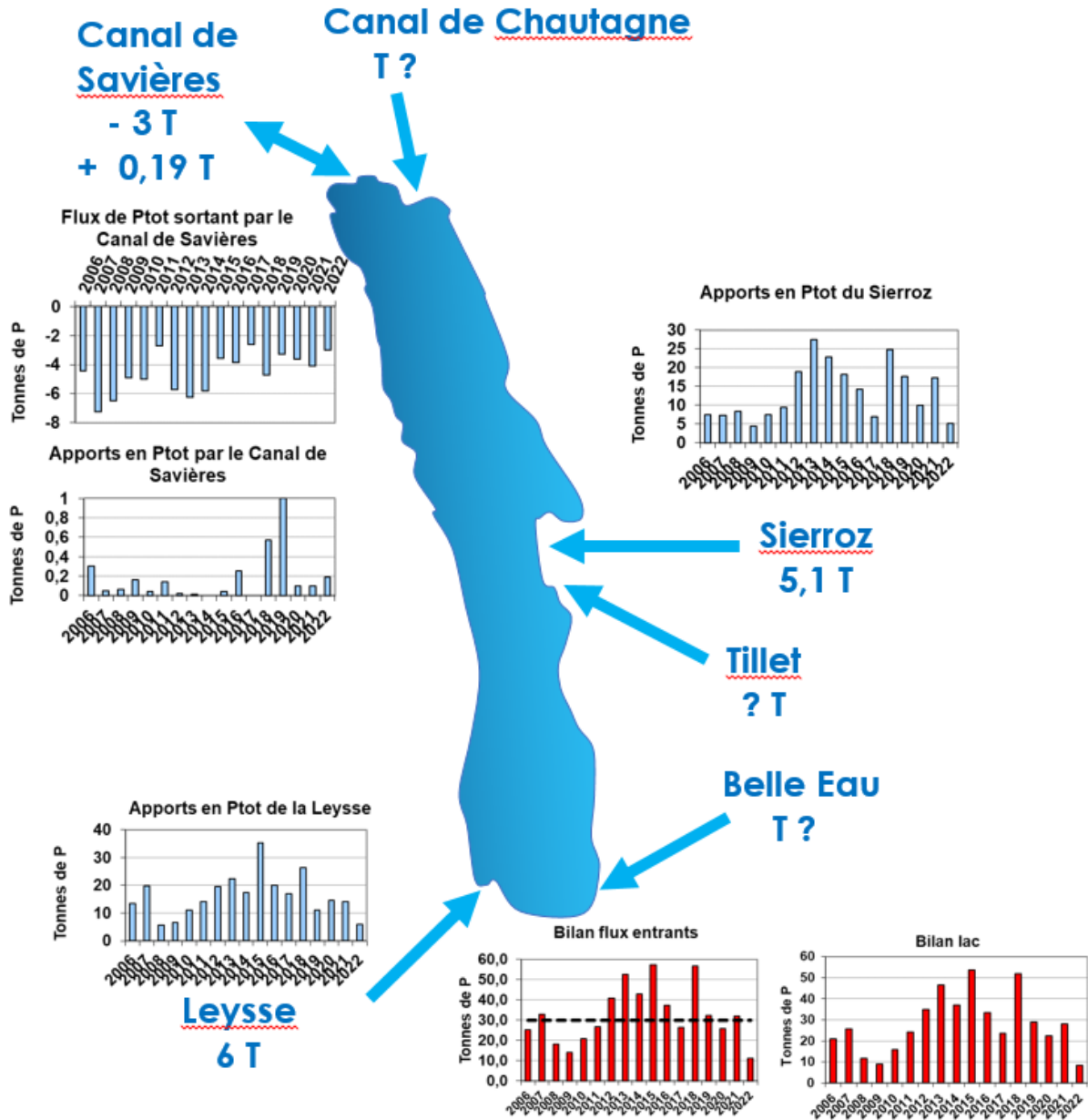
Statistiques de pêche professionnelle 1995-2022



Positionnement du lac du Bourget, comparativement aux lacs léman et d'Annecy pour différentes années en terme de Df et BI. La note de l'IBL est indiquée entre parenthèses



Bilan des entrées/sorties en Ptot au lac



Quelques recommandations

Même si la vigilance doit rester de mise et que les efforts devront continuer à être menés pour limiter ce type de pollution (en lien avec l'urbanisation croissante du bassin versant, l'affluence touristique, etc...) la menace relative à l'eutrophisation semble de plus en plus s'éloigner du lac du Bourget.

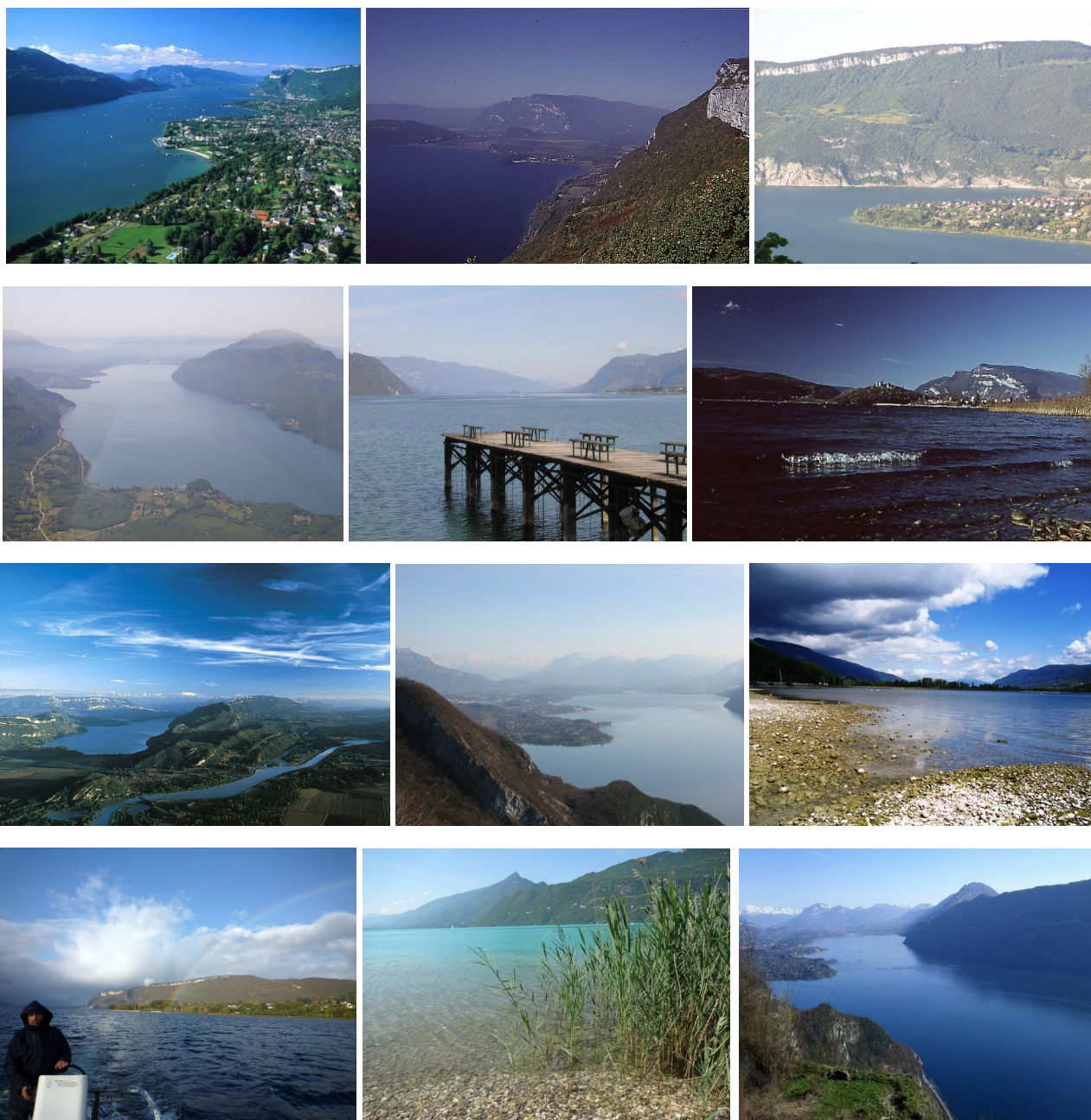
Aujourd'hui, d'autres menaces sont plus réelles et face auxquelles il faut se préparer et réfléchir. Typiquement, il ne fait plus aucun doute que le lac se réchauffe et a accueilli de nouvelles espèces (dites exotiques, et pour certaines envahissantes) au cours de la dernière décennie (silure, moule quagga, petite crevette rouge sang). Ces populations animales sont susceptibles de jouer un rôle important dans la modification de la productivité globale et du fonctionnement écologique du lac du Bourget, des changements sûrement déjà initiés.

Il apparaît donc comme nécessaire de suivre et mesurer plus précisément les impacts du réchauffement climatique, et proposer des suivis et des hypothèses de travail plus spécifiques concernant les espèces exotiques. Les questions sont en effet nombreuses de savoir ce que l'on peut craindre ou espérer, notamment en terme de croissance, volume de biomasse et diversité des espèces piscicoles, par exemple. Le Sandre a disparu et la population de perches régresse ! Cela va-t-il se poursuivre et d'autres espèces sont-elles aussi en proie à disparaître (e.g. l'omble chevalier qui n'aime pas les températures chaudes ?). Le corégone grandit moins ! Est-ce un effet de la température et/ou de la ressource zooplanctonique dont il est constaté une baisse de biomasse pendant la période printanière (période critique pour la croissance des larves de ce poisson) ? La moule quagga est bien implantée ! Va-t-elle entraîner/accentuer le phénomène de benthification* déjà constaté par ailleurs ?

* L'implantation massive des moules quagga se traduit par un volume d'eau filtrée important. Une conséquence directe connue est la production de fèces et de pseudo-fèces qui reflète un transfert d'énergie (matière organique) du seston (de la colonne d'eau) au benthos. Les densités de plancton en suspension dans la colonne d'eau diminuent, le phytoplancton via la consommation directe par les moules et le (micro)zooplancton en réponse à des niveaux plus faibles de phytoplancton à consommer. Cette baisse de la concentration de plancton rend les eaux plus claires et la lumière pénètre beaucoup plus profondément dans le lac, ce qui favorise le développement des macrophytes, désormais plus abondants et répartis plus profondément qu'auparavant. Ce processus appelé « benthification » avec modification de l'habitat a nécessairement des conséquences importantes sur les populations d'invertébrés benthiques et les populations de poissons mais cet aspect reste à être étudié finement pour le lac du Bourget.

Ces questions qui sont à l'interface recherche-gestion devraient être considérées en mettant en face d'elles les moyens financiers nécessaires pour y répondre. Plus que jamais le CISLAB et INRAE-CARTEL ont un rôle important à jouer ici.

Un lac désormais oligotrophe mais ...



L'image offerte en 2022 par le lac du Bourget, pour sa partie pélagique, est très bonne. Le lac, avec des concentrations en Ptot , PO_4 et chlorophylle a très basses, et des transparences moyenne et estivale relativement élevées, peut être caractérisé aujourd'hui comme un écosystème oligotrophe. C'est la première fois qu'il est qualifié comme tel. Les compartiments de macrophytes et de macroinvertébrés révèlent également un bon à très bon état global du littoral. Ce retour complet et définitif à un état oligotrophe (et donc du statut du lac) devra être confirmé au cours des prochaines années. La vigilance devra notamment porter sur (i) l'évolution de la composition phytoplantonique et de la proportion des petites formes, (ii) la structure globale, l'efficacité trophique et les effectifs des communautés zooplanctoniques, (iii) le peuplement piscicole en particulier la biomasse/le rendement de pêche des perches et du corégone (lavaret), (iv) l'impact global que pourrait avoir certaines espèces exotiques.