

Synthèse du

SUIVI SCIENTIFIQUE DU LAC DU BOURGET

pour l'année 2021



Document soumis au comité scientifique (juin 2022)



Citation de ce document

Jacquet, S., S. Cachera, L. Crépin, C. Goulon, J. Guillard, V. Hamelet, J.C. Hustache, L. Laine, P. Perney, P. Quéting, J. Raphy, S. Rasconi, C. Rautureau, F. Rimet, V. Tran-Khac. 2022. Synthèse du suivi environnemental des eaux du lac du Bourget pour l'année 2021. *Rapport INRAE-CISALB*, 24 pages.

RÉSUMÉ

2021 a encore été une année remarquable sur de nombreux aspects.

L'année 2021 a enregistré, avec une **température de l'air moyenne annuelle de 11,9°C**, un écart de **+0,35°C** (+3%) par rapport à la moyenne 1974-2020. Si 2021 n'a donc pas été parmi les années les plus chaudes de la chronique, elle confirme néanmoins la tendance au réchauffement global (la température moyenne fluctuant entre 10 et 11°C dans les années 1970). Les mois d'avril, juillet, août, octobre, novembre et décembre ont présenté des températures très légèrement inférieures à la moyenne (de -1 et -4%). Le mois de mai a par contre été significativement plus froid (-10% par rapport à la moyenne interannuelle). Le reste de l'année, les températures mensuelles ont été supérieures à la moyenne, en particulier l'hiver (comme les années précédentes), avec des pointes de +83% en février et +26% en janvier (*vs* +85% en février 2020, +80% en décembre 2019, +162% en janvier 2018).

Logiquement, la température moyenne de l'eau du lac du Bourget a été impactée. L'année **2021 fait partie des années chaudes** (depuis 2018), en ce qui concerne la température de l'eau mesurée en surface. Avec une température moyenne annuelle de 15,34°C à 2 m de profondeur (une valeur 1,22°C inférieure à celle de 2020 qui reste l'année la plus chaude à ce jour), l'évolution interannuelle des températures moyennes montre malgré tout toujours une **tendance nette au réchauffement depuis 1984**. Comparativement, **la tendance à l'augmentation de la température des eaux profondes est moins nette, même si elle semble réelle depuis quelques années et que 2021 est l'année la plus chaude enregistrée à 140 m avec 6,64°C**. Les conditions météorologiques n'ont pas permis de refroidissement et d'homogénéisation totale de la colonne d'eau, le brassage au mois de mars atteignant 120 m.

Comme les années précédentes, **2021 a été caractérisée par des périodes contrastées en termes de précipitations**, caractérisée par une forte variabilité avec des mois pluvieux (+25% en janvier et +93% en juillet) suivis de mois très secs (-69% en février et -25% en août). La répartition de ces précipitations a donc été celle de mois excédentaires : janvier, mai, juin, juillet et décembre (respectivement +25, +59, +1, +93 et +86% par rapport à la moyenne mensuelle) et de mois déficitaires : février, mars, avril, août, septembre, octobre et novembre (respectivement -69, -29, -41, -25, -29, -14, -61% par rapport à la moyenne mensuelle). Avec une hauteur cumulée de **1 251 mm** de pluie à Voglans, l'année **2021 se situe dans la moyenne** calculée sur la période 1974-2020 (i.e. 1 238 mm).

En dépit des variations de précipitations et de la morphologie du bassin versant du lac du Bourget, le **débit moyen annuel de la Leysse**, avec $6,28 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a été **équivalent au module interannuel** (e.g. $6,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Comparativement, le débit moyen annuel du Sierroz, avec $2,23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, a été légèrement

inférieur au module interannuel (e.g. $2,42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Pour l'ensemble des paramètres analysés en 2021, tout comme en 2019 et 2020, le **Sierroz a présenté des concentrations en nutriments plus élevées que la Leysse**. Ainsi la concentration moyenne en Ptot a été de $55 \mu\text{g L}^{-1}$ (vs $70 \mu\text{g L}^{-1}$ en 2020) pour la Leysse et de $236 \mu\text{g L}^{-1}$ (vs $154 \mu\text{g L}^{-1}$ en 2020) pour le Sierroz.

L'hiver 2021 n'a pas permis une homogénéisation complète de la température de l'eau du lac et de la concentration en oxygène dissous. A la date du 8 mars, la différence de température entre la surface (**$8,11^\circ\text{C}$**) et le fond (**$6,44^\circ\text{C}$**) était déjà très marquée, et la concentration maximale en oxygène au fond n'était que de **$7,09 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$** .

Les concentrations hivernales moyennes (sur la période incluant janvier, février et mars) en **orthophosphates (P-PO₄) et phosphore total (Ptot)**, avec respectivement des valeurs de **$4,0$ et $9,0 \mu\text{gP L}^{-1}$** ont été **légèrement inférieures en 2021** comparativement à 2020 mais globalement comparables depuis 2018. **Ces concentrations restent en effet parmi les plus basses de la chronique** et confirment que le seuil des $10 \mu\text{gP L}^{-1}$ semble 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 **$31,2 \text{ T}$ en 2019, $25,8 \text{ T}$ en 2020 et presque 32 T en 2021.**

Avec une **concentration moyenne annuelle en chlorophylle *a* de $2,7 \mu\text{g L}^{-1}$** , cet indicateur révèle donc une valeur relativement constante depuis 2018 (entre $2,8$ et $3 \mu\text{g L}^{-1}$) et la confirmation d'une **baisse significative** par rapport aux années précédentes, avec des valeurs depuis 2009 oscillant entre $2,7$ et $4 \mu\text{g L}^{-1}$ (moyenne de $3,3 \mu\text{g L}^{-1}$). C'est la 4^{ème} année consécutive que la concentration moyenne annuelle est **sous la barre des $3 \mu\text{g L}^{-1}$** . Cette valeur de concentration de la chlorophylle *a*, considérée uniquement pour la **période estivale**, a aussi été **faible en 2021 (avec $2,4 \mu\text{g L}^{-1}$)**, correspondant même à la valeur la plus faible de la chronique.

La **biomasse phytoplanctonique annuelle (avec $1\,051 \mu\text{g L}^{-1}$) a diminué significativement en 2021 par rapport aux années précédentes** ($1\,323 \mu\text{g L}^{-1}$ en 2020, $1\,510 \mu\text{g L}^{-1}$ en 2019, $1\,250 \mu\text{g L}^{-1}$ en 2018 ou encore $1\,643 \mu\text{g L}^{-1}$ en 2017). Les **indices fonctionnels de Brettum (4,45) et IPLAC (0,78)**, ont aussi augmentés de manière significative par rapport aux années précédentes, et sont en fait parmi les plus hauts mesurés depuis le début de la chronique, signant un (très) **bon état global de l'écosystème pélagique**. Depuis le début de la chronique, avec la baisse des concentrations en P 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 2020, cette contribution avait été la plus élevée depuis le début de la chronique (commencée en 2004) atteignant la valeur de 17%. Elle a été de **$15,7\%$ en 2021**, soit la **seconde plus grande valeur**, la proportion des **formes nanoplanctoniques** (avec 40%) étant aussi la plus élevée de la chronique.

La **transparence moyenne annuelle** de la colonne d'eau observée depuis la surface a été de **6,0 m** soit une valeur nettement inférieure à celle enregistrée en 2020 où elle avait été de 7,3 m, soit une valeur assez proche de celles de 2019 (7,2 m). Le lac ne semble pas avoir été caractérisé par une phase d'eaux claires marquée aux mois de mai et juin, comparativement à 2020, un constat plus en accord avec les années antérieures récentes à 2020.

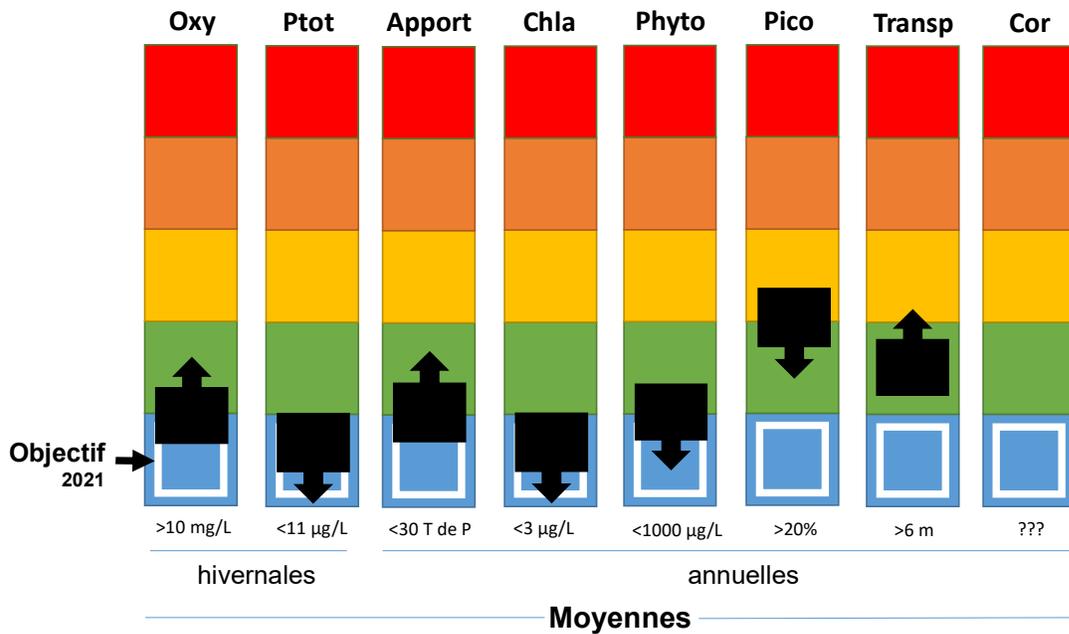
Si la **dynamique du zooplancton** a reproduit globalement celle des années précédentes, elle a été une nouvelle fois **remarquable en 2021** en raison des faibles abondances des herbivores filtreurs observés en hiver et en début de printemps. Les groupes les plus abondants tout au long de l'année ont été les calanoïdes et les copépodes. L'analyse des indices fonctionnels sur la période 2004-2021 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 a permis la prolifération des espèces diversifiées et un transfert efficace vers les niveaux supérieurs.**

La diversité piscicole du lac apparaît comme globalement stable, même si les espèces difficilement capturables par les filets comme la blennie fluviatile (*Salaria fluviatilis*) ou peu abondante comme la vandoise (*Leuciscus leuciscus*), la lotte (*Lota lota*), n'ont pas été capturées en 2021. Le rendement numérique global observées en 2021 est à un niveau bas. Sur le plan pondéral la valeur de 2021 se situe quant à elles dans des valeurs hautes bien qu'en baisse par rapport aux 3 dernières années. Les principaux résultats pour l'année 2021 sont donc i) des niveaux historiques d'abondance de corégones estimée par hydroacoustique et des niveaux élevés dans les pêches scientifiques aux filets, poisson emblématique du lac du Bourget et indicateur d'une bonne qualité des eaux ; la population serait actuellement dominée par des individus de 2 ans mais l'espèce semble rencontrer des problèmes de croissance impactant les rendements de captures des pêcheurs et dont les causes sont encore à préciser ; ii) une population de perches structurée classiquement et dominée par les individus de l'année ; iii) la confirmation de l'absence du sandre depuis 2019 dans les pêches scientifiques ; iv) enfin, il ne fait plus de doute que le silure est désormais bien installé dans le lac. L'image du peuplement de poissons du lac du Bourget permet donc de **confirmer l'amélioration de la qualité des eaux** observées aux travers des autres indicateurs mais la vigilance reste de mise concernant la baisse de captures de corégones chez les pêcheurs professionnels.

2021 continue de s'inscrire dans la dynamique de réoligotrophisation générale du lac eu regard notamment de certains descripteurs comme les teneurs (basses) en Phosphore et chlorophylle *a*, la biomasse (faible) et la structure (en taille et en taxon) phytoplanctonique, les abondances (en hausse) du corégone. L'examen 2021 du lac du Bourget confirme donc un très bon état écologique global de l'écosystème pélagique. Le lac est en passe de re-devenir oligotrophe sans toutefois y avoir encore basculé complètement.

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

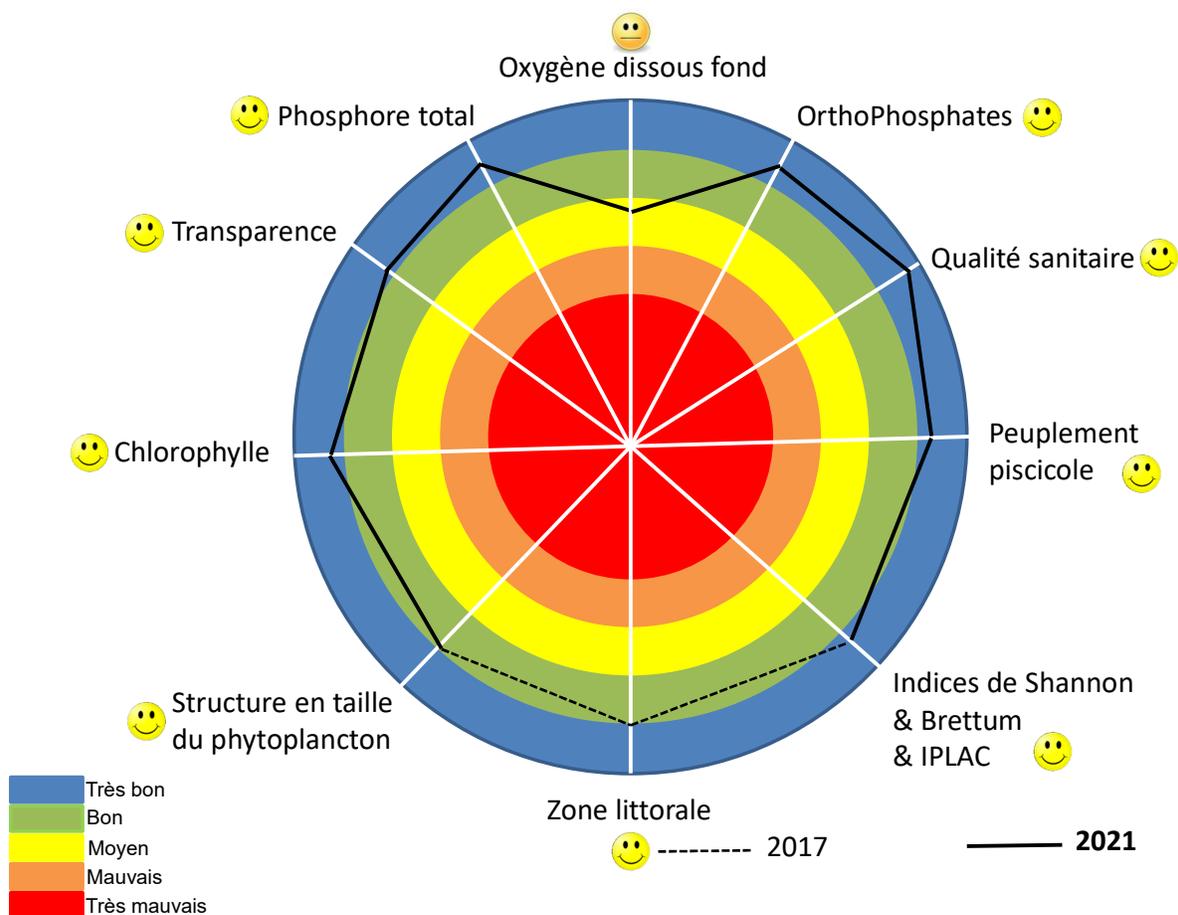
État (■) en 2021 et tendance (▴) depuis 2020 de l'état écologique du lac du Bourget



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.



Schéma synoptique de l'état du lac proposé pour 2021



L'image offerte en 2021 par le lac du Bourget, pour sa partie pélagique, est assez similaire à celle des années précédentes et peut être résumée comme suit. Le lac, avec des concentrations en Ptot, PO₄ et chlorophylle *a* qui restent très basses, et une transparence relativement élevée, peut être caractérisé comme un écosystème presque oligotrophe. Presque, car ce statut global (le retour complet à un état oligotrophe) reste à être complètement et définitivement confirmé par la concentration et composition phytoplanctonique ou encore la proportion des petites formes, sans oublier l'ensemble des descripteurs de la zone littorale. La structure globale, l'efficacité trophique et les effectifs des communautés zooplanctoniques et piscicoles ainsi que la biomasse/rendement de pêche du corégone (lavaret) de nouveau en hausse confirment la réoligotrophisation et le très bon état global de l'écosystème.

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
Oligotrophe	<=10 9,5	<2.5 2,7	2.5-8 4,9	>6 6,0	>3
Mesotrophe					2,3
Eutrophe	10-35	2.5-8	8-25	6-3	3-1.5
Hyper-eutrophe	35-100	8-25	25-75	3-1.5	1.5-0.7
	>=100	>25	>75	<1.5	<0.7

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 2021
Secchi (m)	> 4,1	6,0
Nitrate (µg NO ₃ ⁻ /L)	<1200	493
Ammonium (µg NH ₄ ⁺ /L)	<74,2	7,3
Phosphore total (µgP/L)	<11	9,9
IPLAC	>0,8	0,78

CE QU'IL FAUT RETENIR POUR L'ANNÉE 2021

Les 20 **campagnes** de terrain prévues en 2021 ont pu être réalisées.

Avec une **température moyenne annuelle de 11,9°C**, valeur supérieure de 0,35°C soit 3% par rapport à la moyenne 1974-2020, l'année 2021 s'inscrit dans la lignée des années qui confirment le réchauffement global enregistré autour du lac. Les mois d'avril, juillet, août, octobre, novembre et décembre ont présenté des températures très légèrement inférieures à la moyenne (de -1 et -4%) et le mois de mai une baisse marquée de -10% par rapport à la moyenne interannuelle. Le reste de l'année, les températures mensuelles ont été supérieures à la moyenne avec +83% en février et +26% en janvier.

		Moyenne 1974 - 2020	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Moyenne annuelle	°C	11,55	12,3	12	11,7	12,4	9,65	12,4	12,1	11,3	12,7	12,4	12,2	12,2	13,3	12,6	12,9	11,9
Ecart / moyenne interannuelle calculée depuis 1974	%		9,3	6,5	3,4	9,4	-1,4	9,9	4,8	0	11,4	8,7	7	6,6	15,9	9,9	12,1	3

A **2 m de profondeur, les températures** pour les périodes de janvier au début de mars et d'août à d'octobre ont été légèrement plus élevées qu'en 2020. Les températures pour les mois printaniers ont par contre été plus faibles qu'en 2020. Le maximum a été mesuré le 22 juin 2021 avec 24,10 °C, soit une température du même ordre de grandeur que l'année 2020 au 18 août 2020 avec 24,79 °C. Les températures pour les mois d'octobre et de décembre en 2021 ont été comparables à celles de l'année 2020. **Il a fait globalement « plus froid » qu'en 2020 avec** une moyenne annuelle de température pour l'année 2021 à 2 m de 15,34 °C, soit 1,22°C de moins 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 >15°C en 2021). Comparativement, les **températures de la couche profonde n'ont pas (encore) révélé de tendance à long terme en terme de réchauffement**, mais il faut noter que 2021 et 2020 ont été significativement plus chaudes que 2018 et 2019 et que **les dernières années semblent être plus chaudes à 140 m**. Avec une moyenne de 6,64°C à 140 m, **2021 est l'année où la température est la plus élevée de la chronique depuis 1991**.

Avec une hauteur cumulée de **1 251 mm** de pluie à Voglans, l'année **2021** se situe dans la **moyenne** sur la période 1974-2020. Des précipitations excédentaires ont été enregistrées pendant les mois de janvier, mai, juin, juillet et décembre (respectivement +25, +59, +1, +93 et +86% par rapport à la moyenne mensuelle) alors que les mois de février, mars, avril, août, septembre, octobre et novembre ont été déficitaires (respectivement -69, -29, -41, -25, -29, -14, -61% par rapport à la moyenne mensuelle). L'année **2021** a donc été marquée par **des périodes contrastées** (comme les années précédentes),

caractérisée par des mois très pluvieux (+25% en janvier et +93% en juillet) suivis de mois très secs (-69% en février et -25% en août).

		Moyenne 1974 - 2020	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Cumul annuel	mm	1 238	1004	1238	1214	929	1031	1079	1385	1467	1231	1332	1181	1094	1150	1234	1031	1251
Ecart / moyenne interannuelle calculée depuis 1974	%		-23	-5	-7	-29	-21	-17	7	13	-5	2	-9	-12	-7,5	-0,7	-0,1	-4

L'hydrologie de la **Leysse** en **2021** a été marquée par un **débit moyen comparable** au module interannuel. Les débits instantanés ont été **inférieurs au module durant 242 jours**. De plus, les débits ont été inférieurs au Q_{mna5} durant 59 jours et au débit minimum biologique pendant 48 jours (identique à 2020) dont une période de 19 jours consécutifs en fin septembre.

		Source DREAL sur 55 ans		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
		Q_{MNA5}	Module														
Moyenne annuelle	m ³ /s	0,68	6,26	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
Q < module inter annuel	jours			244	307	287	311	277	177	243	223	223	304	233	240	240	242
Q < Q_{MNA5} inter annuel	jours			0	51	15	0	0	0	0	0	9	48	70	38	58	59

Le **débit moyen annuel** en **2021** du **Sierroz** a été **légèrement inférieur** au module (-8%). Les débits instantanés ont été **inférieurs au module durant 265 jours** (72% du temps) et inférieurs au Q_{MNA5} durant 1,5 jours. Enfin, le débit minimum biologique a, lui aussi, été dépassé pendant 7,5 jours (3 jours consécutifs fin septembre).

		Source DREAL sur 55 ans		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
		Q_{MNA5}	Module														
Moyenne annuelle	m ³ /s	0,22	2,42	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
Q < module inter annuel	jours			241	301	275	319	256	135	232	183	227	308	192	272	290	265
Q < Q_{MNA5} inter annuel	jours			0	82	15	1,5	25	0	26	20	13	16	73	28	8	1,5

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 Ptot au lac (mesurés sur eau brute) ont varié entre 13 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
Ptot (Leysse et Sierroz + DO)	300	150	94	27	14	11	18	24	38	50	40	53,4	31,9	26,3	51	28,8	24,4	31,5
				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	0,3
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	3,2	1,81
NO ₃	1,5	580	450	367	290	214	309	181	347	409	275	275	264	202	302	324	259	284
NO ₃ + NKT				617	516	334	454	360	654	704	503	510	462	378	544	538	396	469

Après des années de faibles apports en nutriments entre 2007 et 2011, les années 2012 à 2015 ont été marquées par une hausse. La baisse amorcée à nouveau en 2017 (avec 28,7 T) a été confirmée en 2019 (avec 31,2 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. **En 2021, les apports ont été supérieures à ceux de 2020 avec 31,8 T.** Le canal de Savières et le déversoir des Biâtres en apportant ~1 T de Ptot au lac ont été responsables de <5% des apports totaux en 2021. 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 quant aux conséquences sur l'eutrophisation.

Le volume total transité en 2021 par la Leysse et le Sierroz a été d'~267 Mm³. 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 78% des apports de Ptot au lac (vs 86% en 2020). Pour la Leysse, les apports en temps de pluie de Ptot ont été de 11,1 T, soit une valeur assez comparable à 2020 (12,4 T), légèrement plus élevée qu'en 2019 (9,76 T) et bien plus basse que les 26,2 T enregistrés en 2018. Les 10 principales crues, principalement en période hivernale (les principales ont eu lieu en février), ont représenté 78% des apports liés aux épisodes de pluie. Les apports de Ptot en temps de pluie du Sierroz

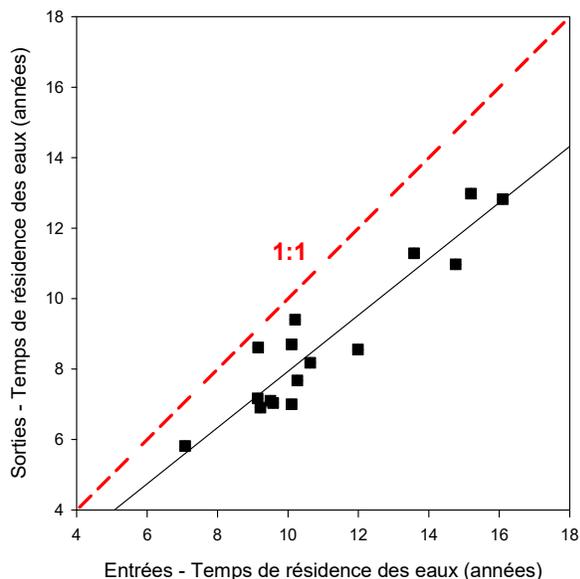
se sont élevés à 14,9 T (vs 8,3 T en 2020, 13,6 T en 2019 et 21,5 T en 2018). Courant septembre 2020, le bassin de stockage-restitution de 10 000 m³ « des Biâtres » a été mis en service. Celui-ci capte les eaux unitaires rejetées vers le lac lors des épisodes pluvieux importants (seul le trop plein de ce dernier est rejeté au lac). **Depuis le déversoir, les flux de Ptot rejetés au lac** ont varié de 2,3 en 2012 à 6 tonnes en 2007. Pour l'année **2021**, ces rejets ont été évalués à 0,33 T pour 169 519 m³ répartis sur 44 jours soit **1,03 % des apports totaux en Ptot au lac**. Au total, **le temps de pluie** a représenté **72% des apports annuels de Ptot**.

De façon générale, les concentrations en éléments phosphorés sont toujours plus élevées dans le Sierroz que dans la Leysse. Depuis les 6 dernières années la concentration en Ptot se stabilise sur la Leysse avec une concentration moyenne de 0,07 mg L⁻¹. Sur le Sierroz la concentration en Ptot est de 0,24 mg L⁻¹, équivalente à 2019 et dans les valeurs moyennes de la chronique 2008-20. Depuis 2008, les concentrations en PO₄ sur la Leysse, sont relativement stables (comprises entre 0,005 et 0,01 mg L⁻¹). Sur le Sierroz, une hausse des concentrations a été observée de 2018, 2019 et 2020 (respectivement 0,030, 0,035 et 0,043 mg L⁻¹). En 2021, une chute importante des concentrations a été enregistrée avec 0,013 mg L⁻¹, valeur la plus basse jamais enregistrée. Pour l'azote, en particulier les nitrates, les concentrations moyennes pondérées de la Leysse restent relativement stables autour de 0,97 mg L⁻¹. Celles du Sierroz sont plus variables, entre 1,17 et 2 mg L⁻¹. Après une légère hausse en 2018 et 2019, la concentration se stabilise autour de 1,46 mg L⁻¹. En 2021, les concentrations en MES sont fortes pour le Sierroz avec 523 mg L⁻¹ (équivalente à la moyenne des 14 dernières années avec 445 mg L⁻¹). Les valeurs les plus importantes sont enregistrées début mars, mai et novembre, périodes de crues importantes. Les concentrations en MES de la Leysse sont relativement basses par rapport à la moyenne interannuelle (160 mg L⁻¹ pour 277 en moyenne).

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 ($r=0,92$, $n=16$) 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. **En 2021, la différence entre « entrée » et « sortie » est supérieure à la moyenne de la chronique (soit 3,1 an, différence entre 10,1 ans et 7,0 ans)**. 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
<i>minimum</i>	6,3	5,8	-0,8
moyenne	10,9	8,8	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 **2021**, les valeurs de **transparences moyennes annuelle et estivale ont été respectivement de 6,0 et 3,9 m** (vs respectivement 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 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 (à la limite de l'oligotrophie) 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 enregistrés cette année là. **Les valeurs de Ptot et PO₄ en 2021 et 2020 ont été respectivement de 9,5 et 4,1 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.

2021 est la **quatrième 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 **2,74 (2021) vs 2,85 (2020), 2,95 (2019) et 2,9 (2018) µg L⁻¹**; les années précédentes étant

généralement aux alentours de 3,3 $\mu\text{g L}^{-1}$. 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 $\sim 8 \mu\text{g L}^{-1}$ en 1984 à $\sim 3\text{-}4 \mu\text{g L}^{-1}$ depuis 2010 (année qui avait vu « disparaître » la cyanobactérie filamenteuse toxique *P. rubescens*). En 2021, **la valeur maximale de la concentration en chlorophylle *a* a aussi été la plus basse enregistrée** depuis le début de la chronique, avec 4,93 $\mu\text{g L}^{-1}$.

Entre 2016 et 2017, la **biomasse phytoplanctonique** avait été réduite de presque moitié, passant de 2 785 à 1 643 $\mu\text{g L}^{-1}$. Cette valeur qui avait encore baissé en 2018 avec 1 251 $\mu\text{g L}^{-1}$ était remontée un petit peu en 2019 avec 1 510 $\mu\text{g L}^{-1}$. En 2020, la biomasse du phytoplancton avait de nouveau réduit avec 1 323 $\mu\text{g L}^{-1}$ et **2021 a suivi cette tendance de manière significative avec 1 051 $\mu\text{g L}^{-1}$** . En 2021, la structure en taille du phytoplancton a révélé une **augmentation significative de la proportion du nanophytoplancton, qui atteint 40%**, le picophytoplancton [e.g. les picocyanobactéries seulement] atteignant 15,7% en 2021 vs 17,3% en 2020 (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 (4,45) et l'IPLac (0,78) sont les plus élevés enregistrés** 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 conserve une proportion élevée avec 15,7%. Ceci 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.

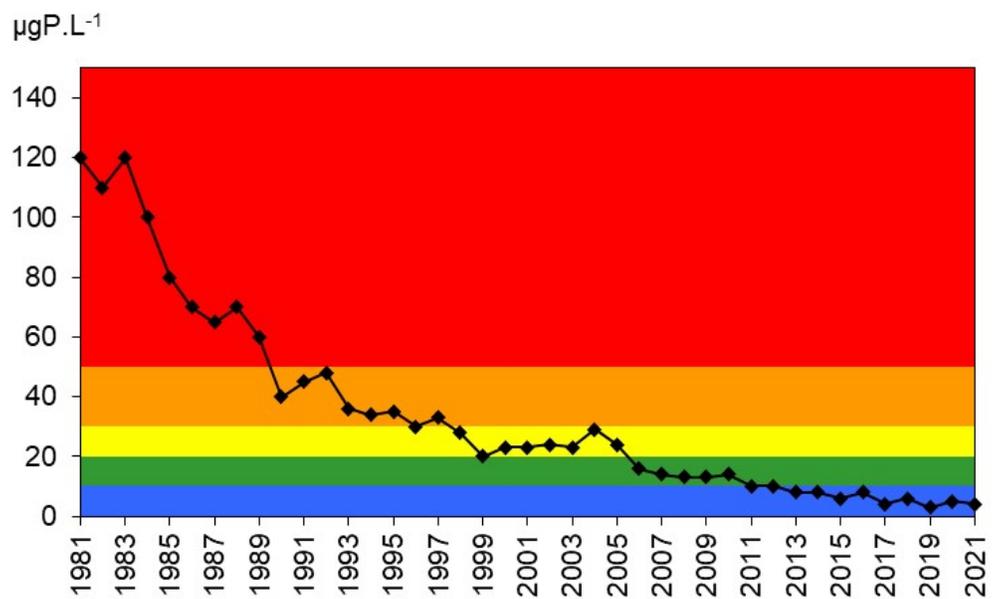
Si la dynamique du zooplancton a reproduit globalement celle des années précédentes, elle a été une nouvelle fois **remarquable en 2021** pour les faibles abondances des herbivores filtreurs observés en hiver et au début du printemps. Bien que le pic maximum ait été représenté par les cladocères, les groupes les plus abondants tout au long de l'année ont été les calanoïdes et les copépodes, avec des abondances très élevée en février et en novembre. On peut avancer l'hypothèse qu'à ce moment de l'année le zooplancton herbivore en suspension (e.g. le calanoïde *E. gracilis*) a été favorisé par rapport aux herbivores filtreurs non sélectifs (e.g. les cladocères *Daphnia* et *Eubosmina*). Une répartition presque homogène entre zooplancton herbivore et prédateur a d'ailleurs été observée à ces périodes de l'année. L'analyse des indices fonctionnels sur la période 2004-2021 a confirmé l'importance de la disponibilité des

ressources nutritionnelles de bonne qualité pour le maintien de l'efficacité trophique au sein du réseau pélagique.

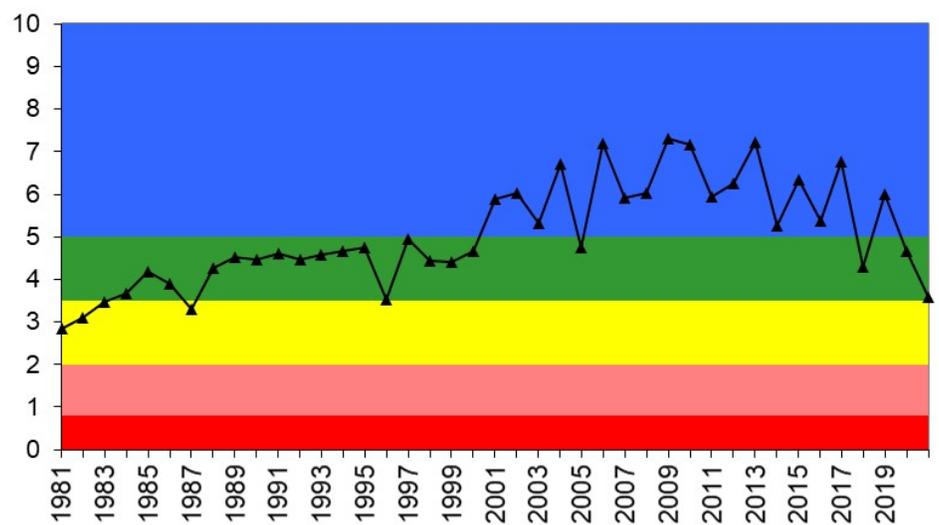
La **diversité piscicole** du lac apparaît comme **globalement stable**, même si les espèces difficilement capturables par les filets comme la blennie fluviatile (*Salaria fluviatilis*) ou peu abondantes comme la vandoise (*Leuciscus leuciscus*) et la lotte (*Lota lota*) n'ont pas été capturées en 2021. Le **rendement numérique global** observé en 2021 est à un **niveau bas**. Sur le **plan pondéral**, la **valeur** de 2021 se situe à un niveau **élevé** bien qu'en baisse par rapport aux 3 dernières années. Les principaux résultats pour l'année 2021 sont donc i) des **niveaux historiques d'abondance de corégones**, estimée par hydroacoustique et des **niveaux élevés dans les pêches scientifiques** aux filets (la population de ce poisson, emblématique du lac du Bourget et indicateur d'une bonne qualité des eaux, serait actuellement dominée par des individus de 2 ans mais l'espèce semble rencontrer des problèmes de croissance impactant les rendements de captures des pêcheurs et dont les causes sont encore à préciser) ; ii) une population de perches structurée classiquement et dominée par les individus de l'année ; iii) la confirmation de l'absence du sandre depuis 2019 dans les pêches scientifiques ; iv) enfin, il ne fait plus de doute que le silure est désormais bien installé dans le lac. L'image du peuplement de poissons du lac du Bourget permet donc de **confirmer l'amélioration de la qualité des eaux** observées aux travers des autres indicateurs, la vigilance restant de mise concernant la baisse de captures de corégone chez les pêcheurs professionnels. D'après les campagnes scientifiques, la diminution de la population de lavarets observée jusqu'en 2017 n'est plus avérée. Toutefois, une diminution de la croissance individuelle des lavarets a été mise en évidence ces 10 dernières années. En 2021, **la perche** serait à un niveau moyennement élevé avec une distribution principalement en zone de bordure et donc un succès de recrutement moyen. Par rapport à l'année précédente, la répartition en taille est plus classique avec un mode principal de moins de 10 cm constitué des individus de l'année. La population de **gardon** est échantillonnée à un niveau moyennement élevé dans les pêches scientifiques. Le nombre de **brochets** capturés reste stable. Les captures de **grémille** sont au plus bas. L'**omble chevalier** semble se maintenir à un niveau satisfaisant mais reste fluctuant et dépendant des quantités d'alevins déversées 3 ans auparavant.



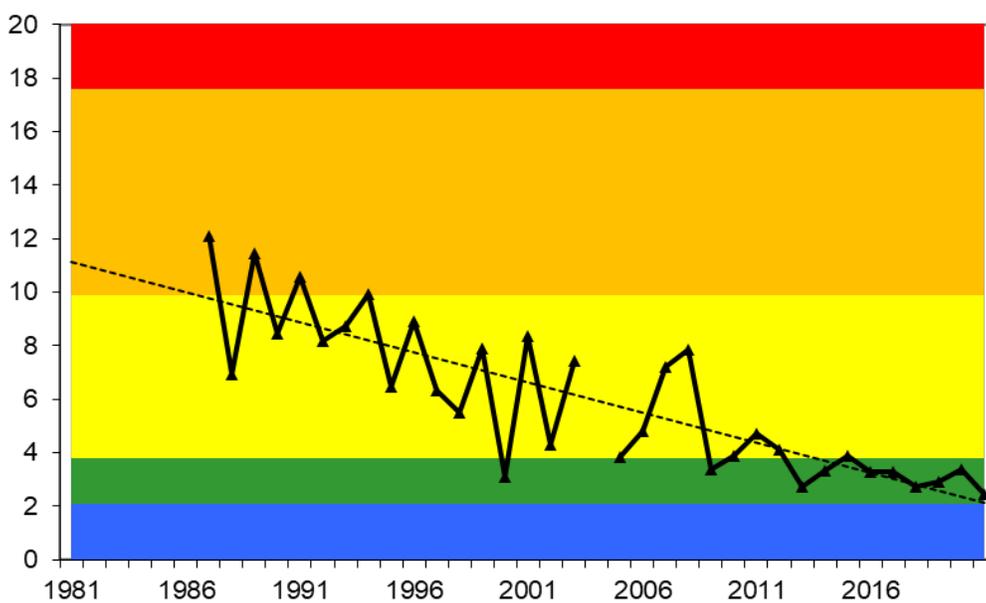
Concentrations en orthophosphates exprimée en $\mu\text{gP L}^{-1}$



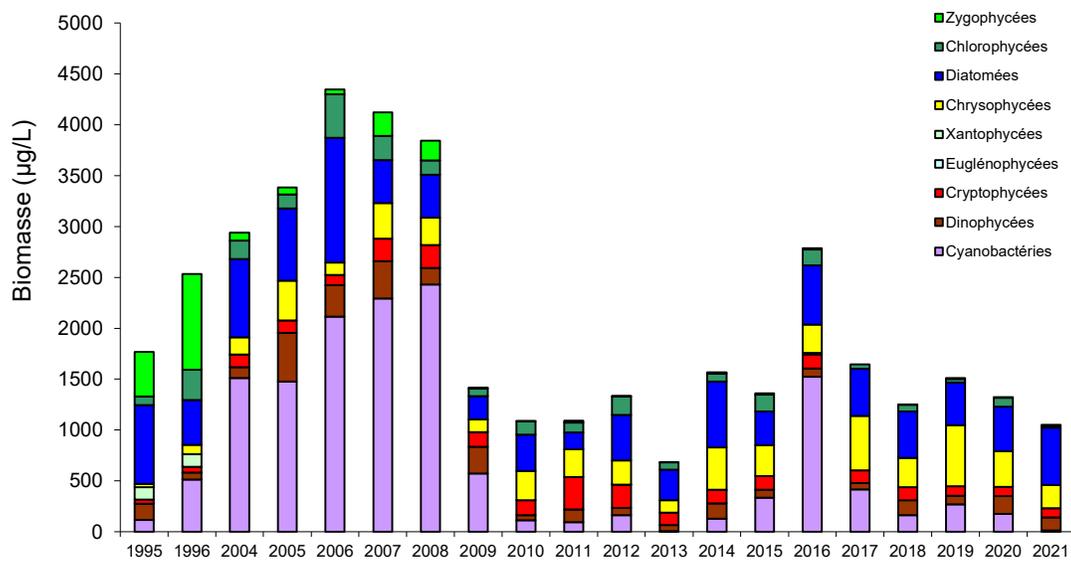
Transparence moyenne estivale exprimée en m



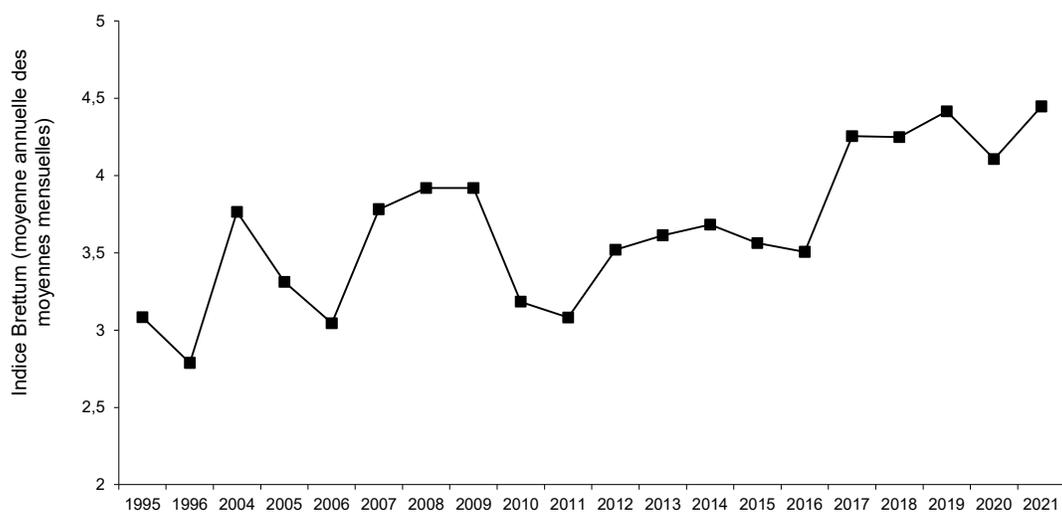
Concentration moyenne estivale de la chlorophylle a exprimée en $\mu\text{g L}^{-1}$



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



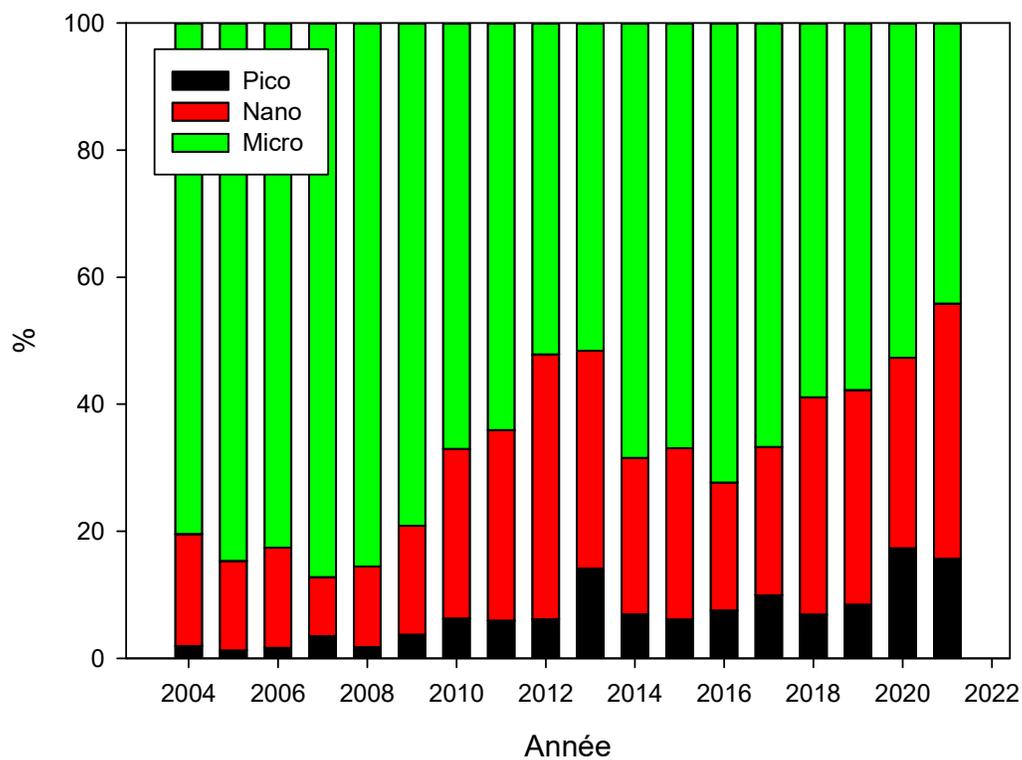
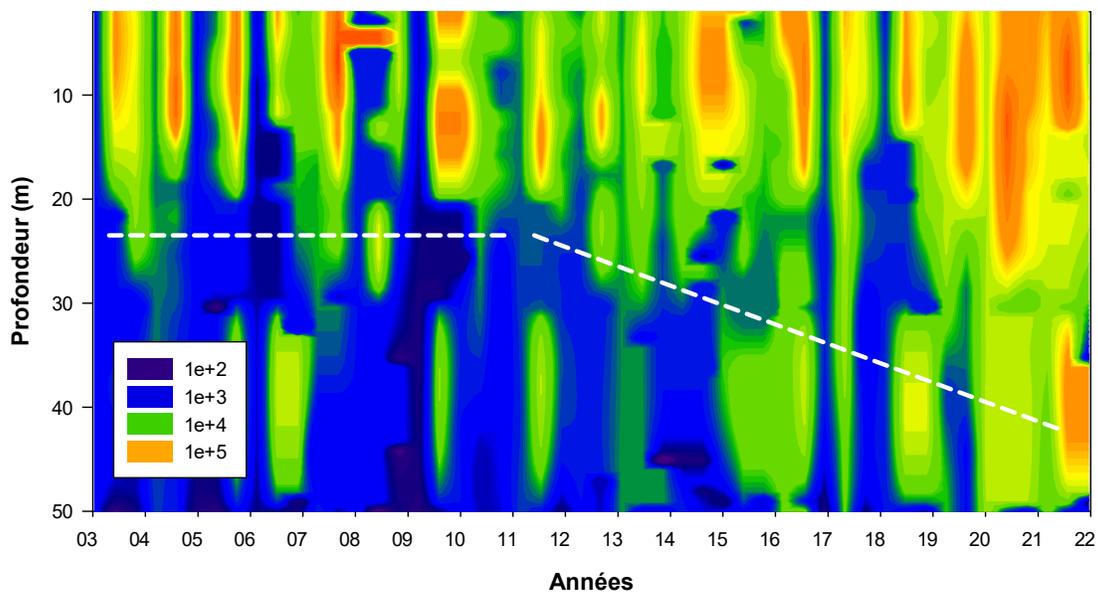
Evolution de l'inde de Brettum



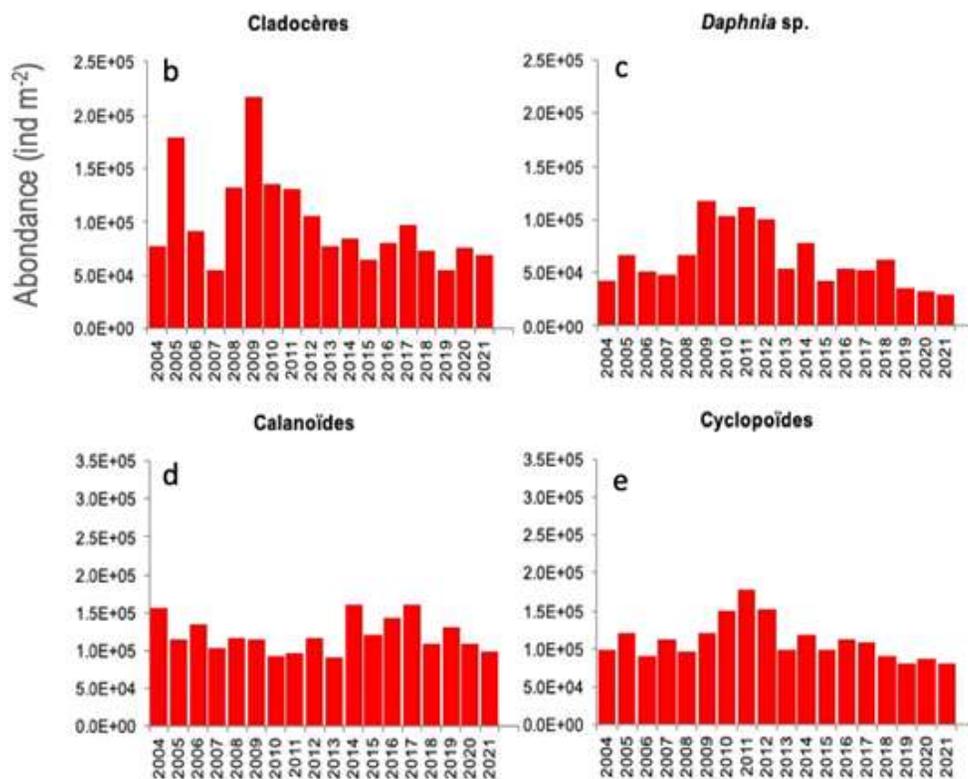
Evolution de l'IPLAC

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

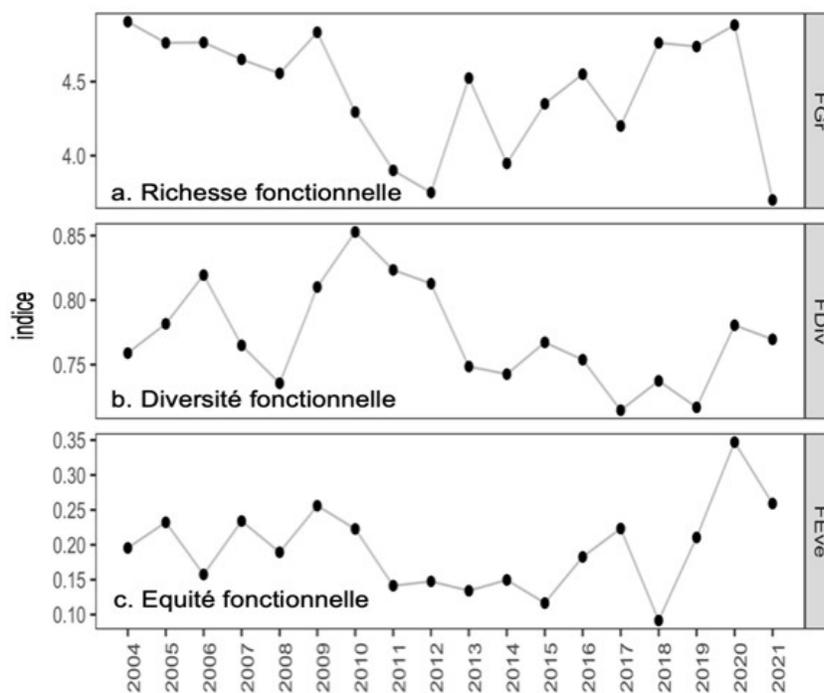
Abondances cellulaires des picocyanobactéries en nombre de cellules mL⁻¹ et biomasse relative du pico-, nano- et microphytoplancton en %



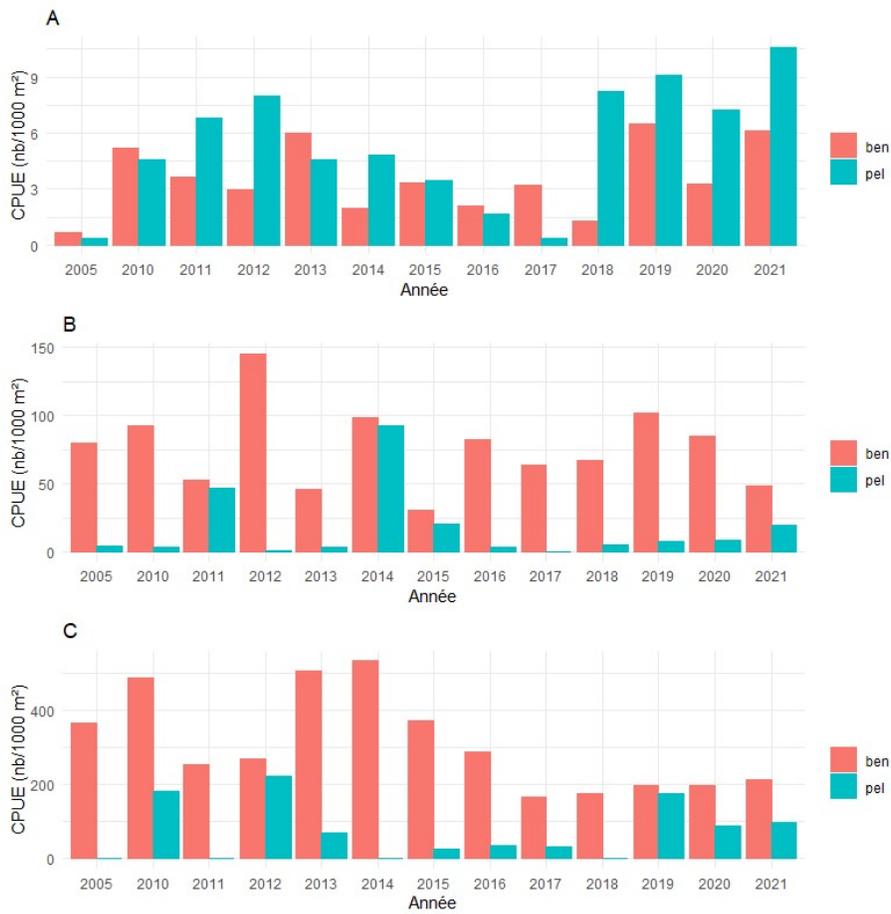
Abondances moyennes annuelles des calanoïdes, des cyclopoïdes, des cladocères et daphnies



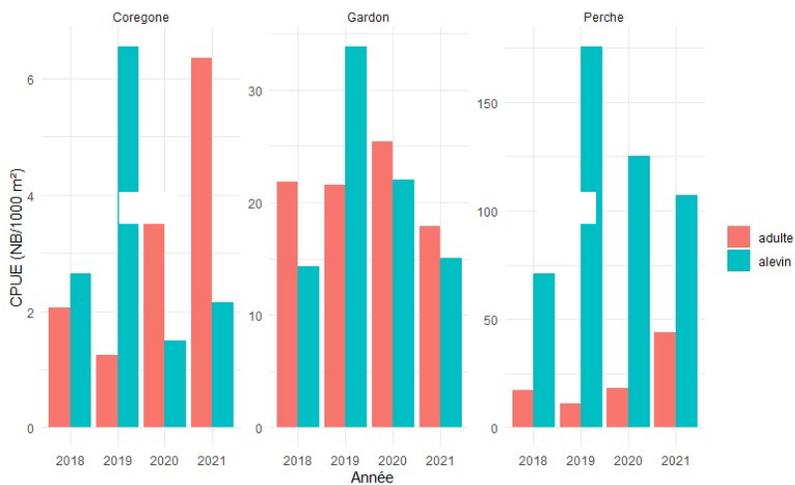
Indices fonctionnels appliqués au compartiment zooplanctonique



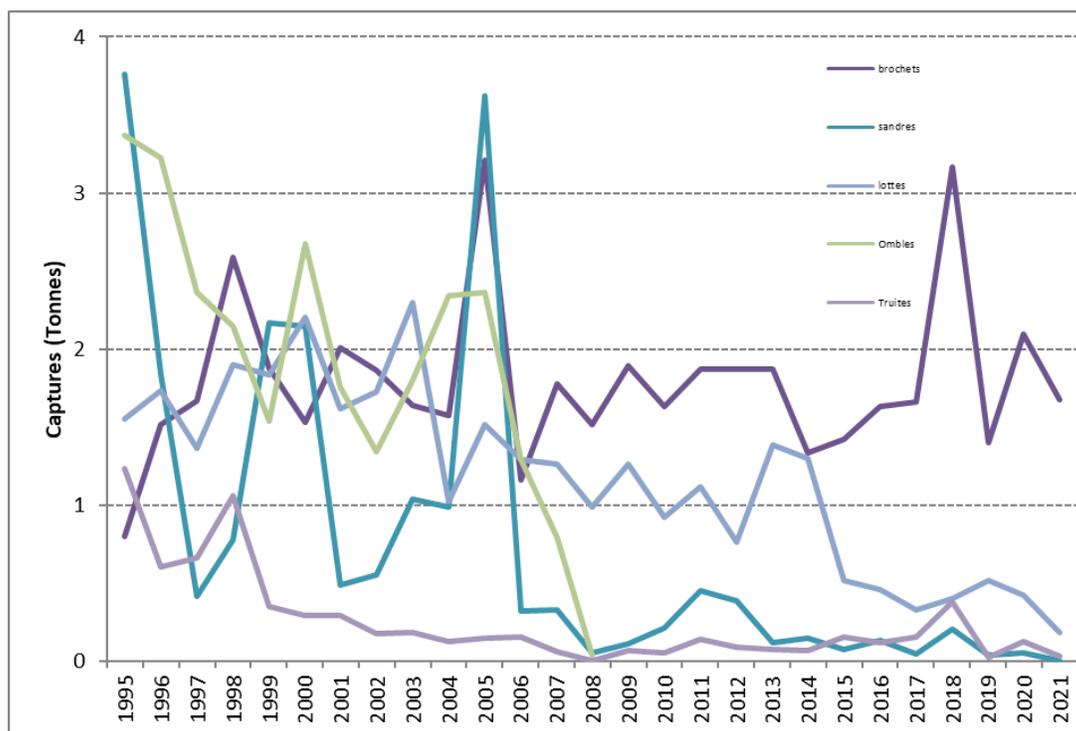
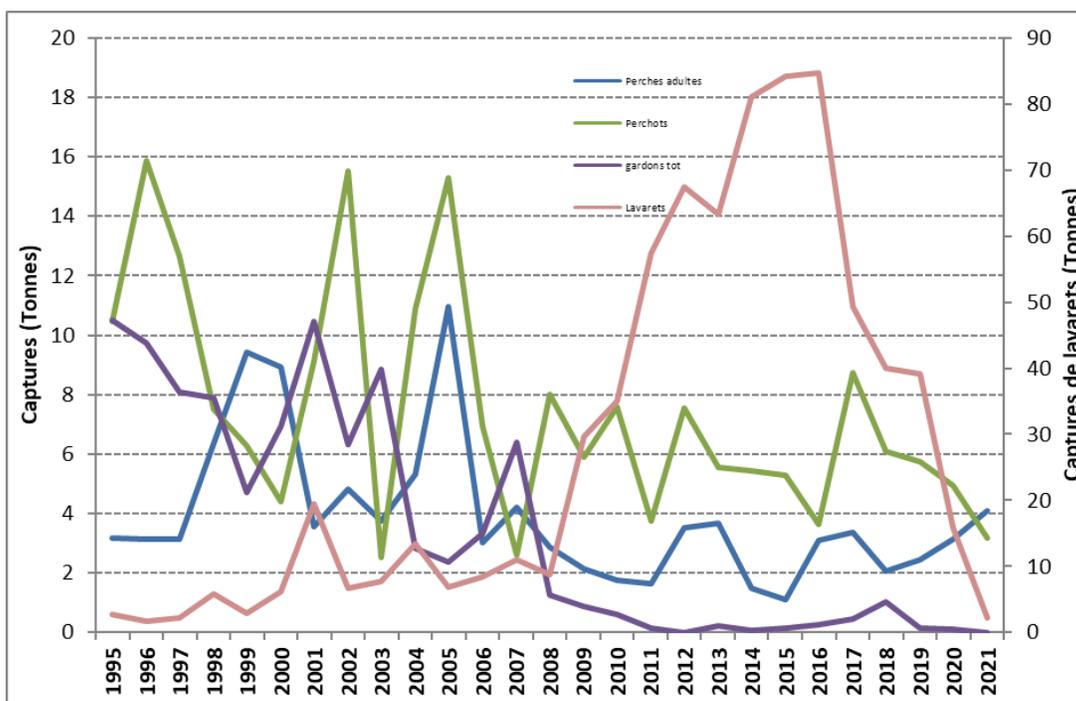
CPUE numériques (Nb/1000 m²) des filets benthiques et pélagiques pour A) le corégone, B) le gardon et C) la perche



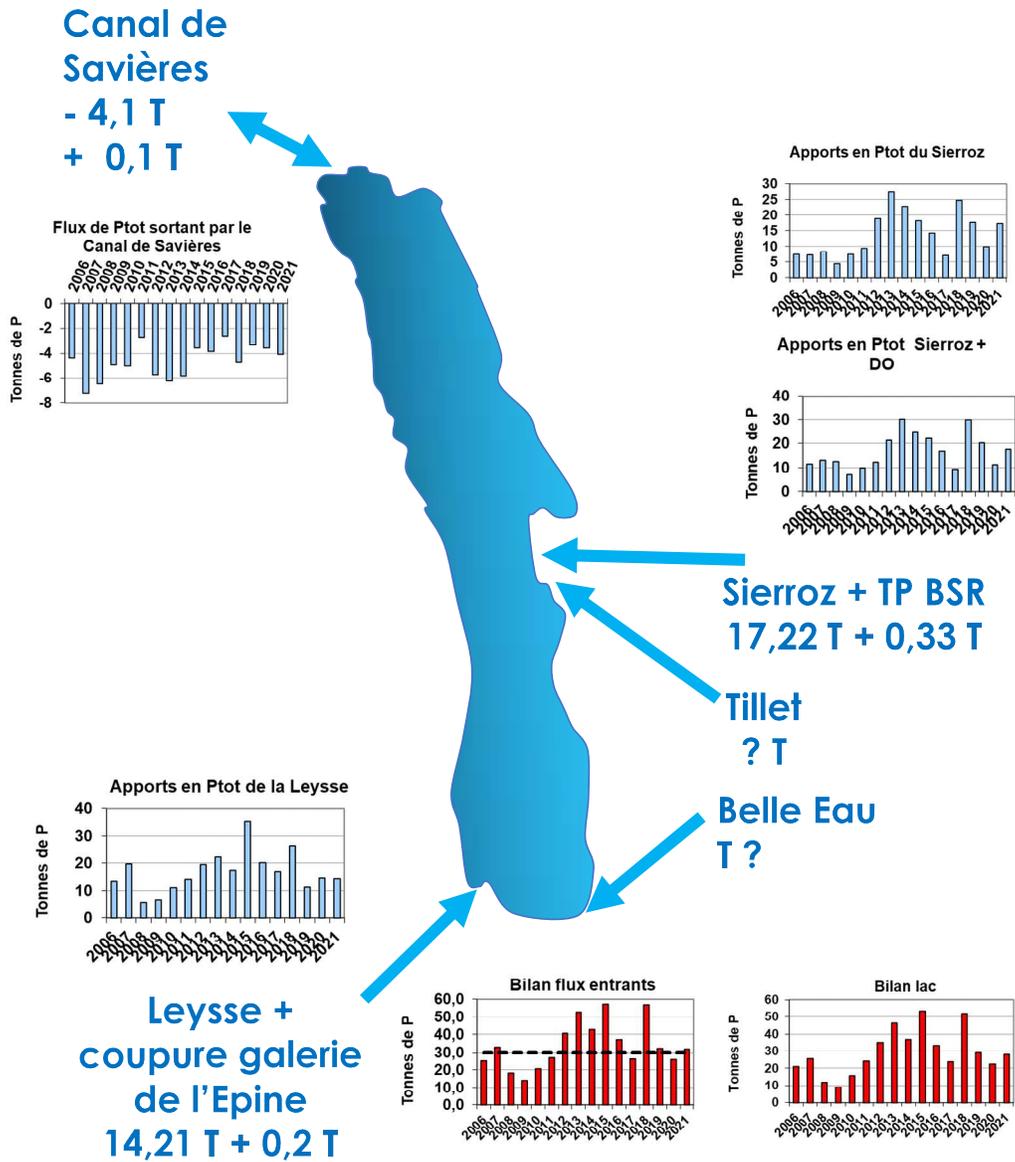
CPUE numériques des adultes (rouge) et des juvéniles (en bleu) pour les corégones, les perches et les gardons



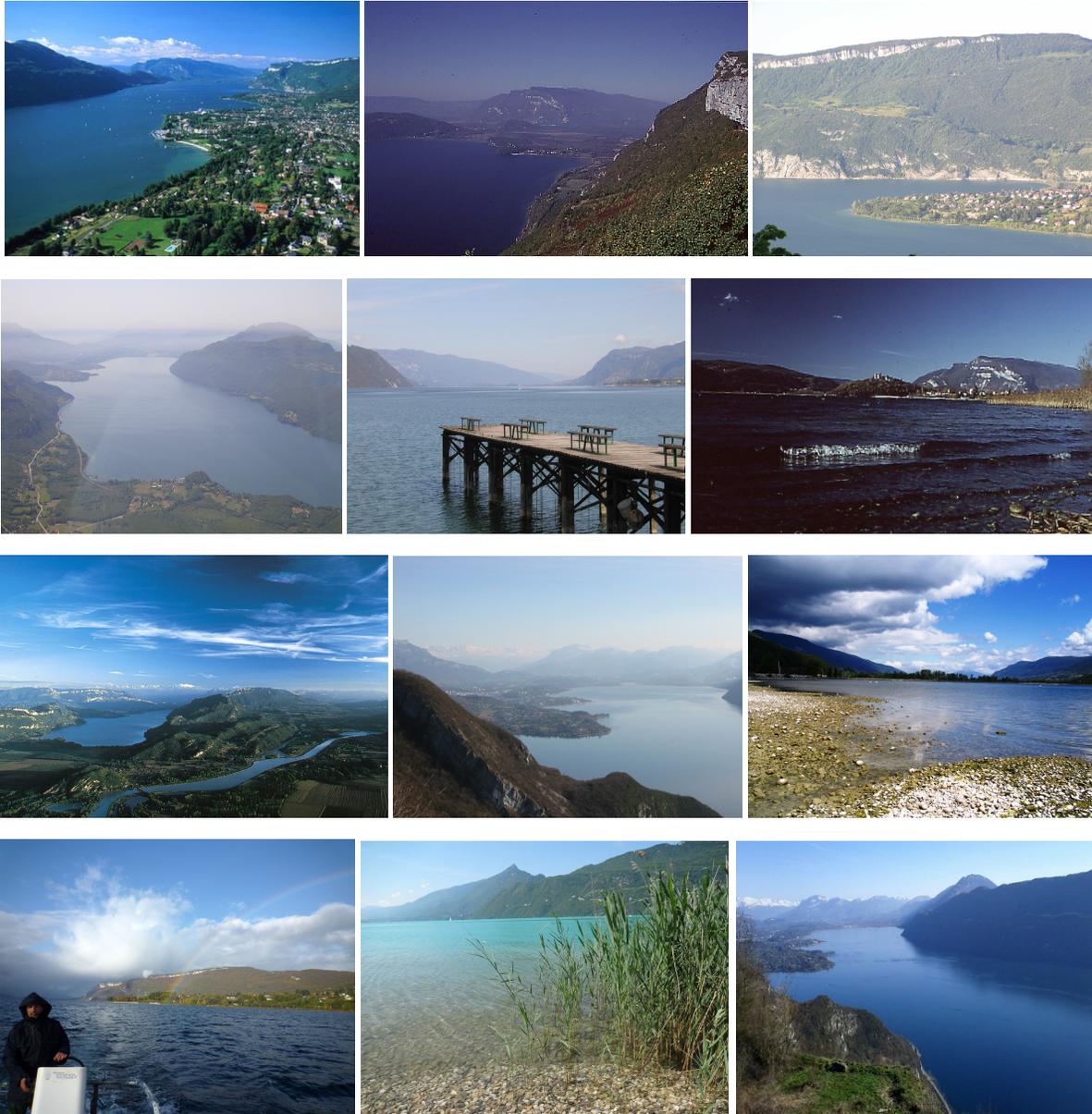
Statistiques de pêche professionnelle 1995-2021



Bilan des entrées/sorties en Ptot au lac



Un lac presque oligotrophe



L'image offerte en 2021 par le lac du Bourget, pour sa partie pélagique, est restée assez similaire à celles des années précédentes et peut être résumée comme suit. Le lac, avec des concentrations en Ptot, PO₄ et chlorophylle *a* très basses, et une transparence relativement élevée, peut être qualifié de presque oligotrophe. Presque car ce statut global (ce retour complet à un état oligotrophe) reste à être complètement et définitivement confirmé par la biomasse et composition phytoplanctonique ou la proportion des petites formes notamment, sans oublier l'ensemble des descripteurs de la zone littorale. La structure globale et les effectifs des communautés zooplanctoniques et piscicoles, la bonne efficacité trophique et la biomasse/rendement de pêche du corégone (lavaret) de nouveau en hausse confirment la réoligotrophisation et le (très) bon état global de l'écosystème.