

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

PHYSICO-CHEMICAL CHANGES IN THE WATERS OF LAKE GENEVA AND METEOROLOGICAL DATA

CAMPAGNE 2022

PAR

Viet TRAN KHAC, Philippe QUETIN et Orlane ANNEVILLE

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (UMR CARTELE, INRA, USMB), CS 50511, FR - 74203 THONON-LES-BAINS Cedex

RESUME

L'année 2022 se distingue par des conditions météorologiques exceptionnellement chaudes, un très fort ensoleillement et une pluviométrie modérée. Elle représente la plus chaude année jamais enregistrée en France depuis 1900. En conséquence, la température de la couche d'eau entre 0 et 10 mètres en 2022 est nettement supérieure à celle de 2021. Par exemple, la différence des températures entre ces deux années était de 5.7°C pour le mois de juin.

Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 6.1°C soit une augmentation continue de 1°C depuis le dernier brassage complet en 2012.

En 2022, la profondeur du brassage hivernal partiel est observée à 130 m au mois de mars. Ce brassage partiel n'est pas suffisant pour réoxygéner l'eau de la couche profonde du lac. La concentration en oxygène dissous au fond du lac est de 2.3 mgO₂/L au moment du brassage et reste inférieure à 3 mgO₂/L pour toute l'année. La valeur minimale est de 0.9 mgO₂/L au mois d'octobre, soit la concentration la plus faible depuis 2012.

En 2022, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total est de 16.9 µgP/L. La concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphates est de 13.5 µgP/L.

La concentration des ions chlorures dans le Léman continue d'augmenter après une période de stabilisation observée entre 2016 et 2021. La concentration moyenne annuelle de 2022 s'élève à 10.7 mg/L.

Deux phénomènes spécifiques se sont manifestés au cours de l'année 2022. Premièrement, une augmentation significative des températures de l'hypolimnion en début d'octobre en raison de l'upwelling engendré par la gyre cyclonique et l'enfoncement de la thermocline saisonnière. Deuxièmement, la transparence exceptionnelle de la colonne d'eau avec une moyenne annuelle de 9.8 m et une moyenne pour la période entre mai et septembre de 8.9 m.

ABSTRACT

The year 2022 was characterized by exceptionally warm weather conditions, abundant sunshine and moderate precipitation. It represents the warmest year ever recorded in France since 1900. Consequently, the water temperatures recorded in 2022 between 0 and 10 m were significantly higher than those recorded in 2021. The difference in the monthly average temperature of this layer is 5.7°C in June.

During winter, the lowest temperature recorded at the bottom of the lake was 6.1°C, inducing a cumulative warming of 1°C since the last complete winter mixing in 2012.

In 2022, the winter mixing was partial and reached 130m depth in February. This weak mixing prevented oxygen supplies in the water of the deep layers of the lake. The dissolved oxygen concentration at the bottom of the lake was 2.3 mgO₂/L during mixing and remained below 3 mgO₂/L throughout the year. The minimum value was 0.9 mgO₂/L in October, which has been the lowest concentration since 2012.

In 2022, the annual average concentration of total phosphorus and orthophosphate were respectively 16.9 µgP/L and 13.5 µgP/L.

The chloride concentration in Lake Geneva continued to increase following a period of relative stable conditions between 2016 and 2022. The annual average in 2022 was 10.7mg/L.

In 2022, two noteworthy phenomena have been observed. First, the hypolimnetic layer experienced warming as a result of the contribution of two processes: an upwelling triggered by a cyclonic gyre along with the seasonal deepening of the thermocline. Secondly, the water column has had a remarkable transparency with an annual average of 9.8 m and the average transparency during the period of maximum phytoplankton growth (May to September) was 8.9 m.

1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman réalisé dans le Grand Lac à la station SHL2 en 2022, et présente l'évolution de 17 paramètres (température, pH, oxygène dissous, phosphore total, orthophosphates, phosphore total particulaire, azote total, azote ammoniacal, nitrate, azote organique particulaire, chlorure, carbone organique particulaire, silice, et transparence).

L'ensemble des conditions météorologiques de l'année 2022 (température de l'air, pluviométrie, ensoleillement, rayonnement global et vents) est intégré à ce rapport et figure en annexe V. Cette annexe prend en compte les données des quatre stations météorologiques de Genève-Cointrin, Changins, Pully et Thonon-INRAE (Fig 1).

Le présent rapport utilise les données du suivi environnemental du Léman fournies par l'Observatoire OLA (Observatoire des Lacs Alpins) pour la période 1973-2022 (SOERE OLA-IS 2022).

2. MÉTHODES

Les stations de mesure des paramètres physico-chimiques dans les eaux du Léman sont représentées sur la figure 1. La station SHL2, qui fait l'objet de ce rapport, est située au centre du Grand Lac entre Evian et Lausanne (coord. CH : 534.700/144.950) et correspond à la partie la plus profonde du lac (-309.7 m).

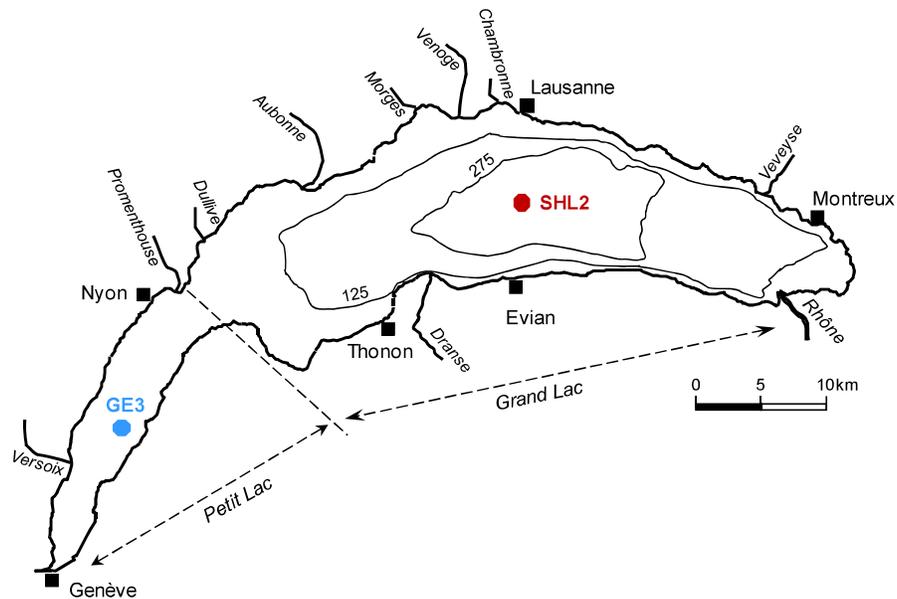


Figure 1 Situation des points de prélèvement pour le suivi de la CIPEL sur le Léman

Figure 1 Location of the sampling stations for the CIPEL monitoring of Lake Geneva

Le point SHL2 a été sélectionné pour surveiller l'évolution à long terme de la qualité physico-chimique du Grand Lac en raison de sa localisation dans la zone pélagique, moins impactée directement par les activités littorales localisées qui contribuent à l'hétérogénéité spatiale des conditions physico-chimiques (ports, rivières...). De plus, ce point qui se situe au niveau de la zone la plus profonde du lac, et permet ainsi d'échantillonner l'intégralité de la colonne d'eau jusqu'à 309 m de profondeur.

Afin de déterminer l'évolution de la qualité des eaux du Grand Lac, les prélèvements sont effectués à 20 profondeurs au point SHL2 : 0 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 250 ; 275 ; 290 ; 300 ; 305 et 309 m. Les stocks et concentrations moyennes pondérées sont calculés à partir des mesures obtenues sur les prélèvements à différentes profondeurs en ce point SHL2 (Annexes II et III).

La fréquence d'échantillonnage est ajustée en fonction du cycle biologique du lac : lorsque l'activité biologique et la composition chimique du lac évoluent rapidement, la fréquence du suivi est plus importante. Elle suit le plan suivant : mensuelle de décembre à février, mois pendant lesquels l'activité biologique est réduite ; bimensuelle de mars à novembre, lorsque l'activité est intense.

En 2022, il y a eu 18 campagnes de prélèvements, réparties selon les dates indiquées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Dates des campagnes de prélèvement, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table 1. Dates of the sampling - Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Campagne no	Date	Campagne no	Date
1	2022-01-19	10	2022-06-21
2	2022-02-09	11	2022-07-05
3	2022-03-08	12	2022-08-01
4	2022-03-21	13	2022-08-17
5	2022-04-12	14	2022-08-31
6	2022-04-28	15	2022-09-13
7	2022-05-10	16	2022-10-04
8	2022-05-23	17	2022-10-17
9	2022-06-07	18	2022-12-20

Les mesures « *in-situ* » et les prélèvements sont effectués selon des techniques uniformisées par l'UMR CARTEL INRAE USMB de Thonon-les-Bains (Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Écosystèmes Limniques : Unité Mixte de Recherche associant l'INRAE et l'Université de Savoie Mont Blanc). Lors de chaque prélèvement, une sonde de pression est couplée à la bouteille de prélèvement afin de déterminer la profondeur réelle de prélèvement. L'étude des relevés de la sonde indique un écart moyen d'un mètre par rapport à la profondeur théorique et une variabilité allant de 0 à 5 m. Ces écarts sont considérés comme acceptables pour la présente étude.

Les échantillons sont analysés par la plateforme d'analyse chimique de l'Observatoire des grands Lacs (OLA) à Thonon-les-Bains. Les méthodes analytiques utilisées sont conformes aux normes de qualité de l'eau normalisées AFNOR et sont comparées par des analyses inter-laboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. Les analyses sont validées par des cartes de contrôle de justesse et de fidélité. Les incertitudes élargies des méthodes sont indiquées dans l'annexe IV.

Lors de chaque campagne, les conditions météorologiques (aspect de l'eau, état de surface, température de l'air, pression atmosphérique, hygrométrie, nébulosité, ensoleillement, direction et vitesse du vent) et la transparence de l'eau sont notées au moment de prélèvements. Les profils verticaux de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH et chlorophylle *a in vivo* avec une résolution de 0.1 m sont également réalisés à l'aide d'une sonde multi-paramètres immergeable CTD-90M (Sea & Sun Technology GmbH).

2.1. VARIABILITÉ ANNUELLE ET INTER-ANNUELLE DES TEMPÉRATURES DE L'EAU

Selon Météo France, l'année 2022 est l'année la plus chaude en France depuis 1900, date à laquelle les enregistrements ont commencé. Cette année a battu de loin le record précédent de 2020 avec une température moyenne de 14.50 °C sur la France en 2022, contre 14.07°C en 2020. Les mesures de températures réalisées autour du Léman (Annexe V) indiquent, à l'exception des mois d'hiver, des valeurs très élevées par rapport aux références (moyennes inter-stations 1991-2020). L'ensoleillement apparaît également particulièrement exceptionnel pour cette année 2022 (Annexe V).

La couche d'eau de surface des 10 premiers mètres est aussi chaude en 2022 que l'année 2021 pour les mois d'hiver, mais à partir du printemps jusqu'à la fin de l'automne, la masse d'eau à la surface est plus chaude en 2022 qu'en 2021. La différence de température varie entre 0.5°C en avril et 5.7°C en juin. La température moyenne estivale de 2022 est de 20,9°C, soit 3.4°C de plus que celle en 2021 (Figure 2).

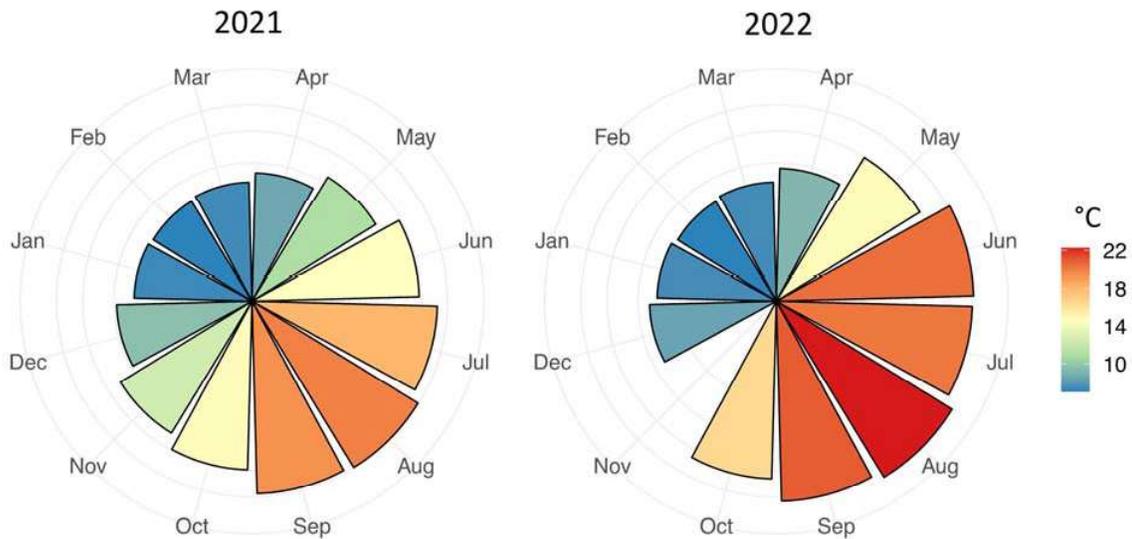


Figure 2 Température moyenne mensuelle dans la couche (0-10 m) en 2021 et 2022, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 2 Monthly average temperature in water layer (0-10 m) in 2021 and 2022, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

En 2022, la température moyenne mensuelle de la couche de surface dépasse de manière significative le 75^{ème} percentile des températures mesurées sur la période allant de 1973 à 2021. Seule la température moyenne du mois de décembre correspond à la médiane de la distribution de température historique (Figure 3).

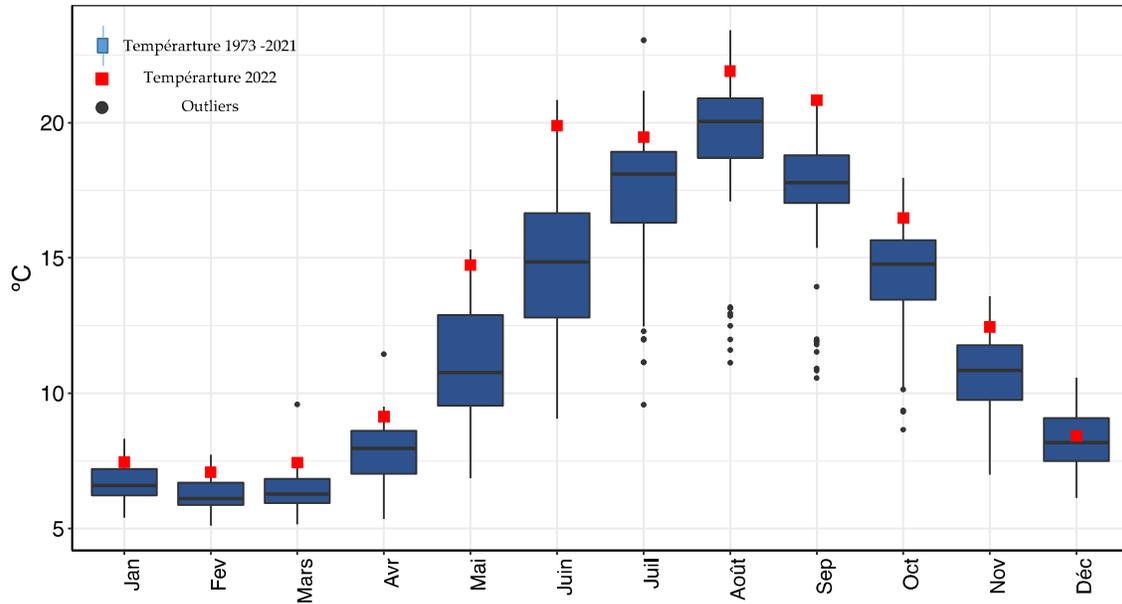


Figure 3 Température moyenne mensuelle de l’eau de la couche (0-10m) du 1973-2021 (boxplot) et en 2022 (carré rouge) – Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 3 Monthly average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 – 2021 (boxplot) and in 2022 (red square), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

En 2022, la profondeur du brassage hivernal partiel est observée à 130 m à la date du 09 février 2022 (Figure 4a).

Ce brassage partiel n’est pas suffisant pour réoxygéner les couches d’eau profonde du lac. La concentration en oxygène dissous mesurée au fond du lac est de 2.9 mgO₂/L (Figure 4a).

Au cours de l’hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 6.1°C. Depuis l’année 2017, les profondeurs du brassage sont respectivement 190 m en 2017, 201 m en 2018, 135 m en 2019, 120 m en 2020 et 145 m en 2021. Le réchauffement climatique a pour conséquence de réduire progressivement la profondeur maximale du brassage hivernal (Schwefel et al., 2016).

À partir du printemps de 2022, la mise en place de la stratification thermique entraîne la reprise de l’activité phytoplanctonique. La stabilité de la colonne d’eau est propice pour le développement phytoplanctonique. Le pic du phytoplancton est observé au mois de mai 2022 (Figure4b, Figure 5).

La stratification estivale maximale est observée le 01 août 2022 avec une température moyenne de 24.2 °C sur 0-10m. Cette température moyenne entre 0-10m est la plus élevée dans le Léman depuis le début des relevés en 1957 (Figure 4c, Figure 5). L’enfoncement de la thermocline est observé le 04 octobre 2022 (Figure 4d, Figure 5).

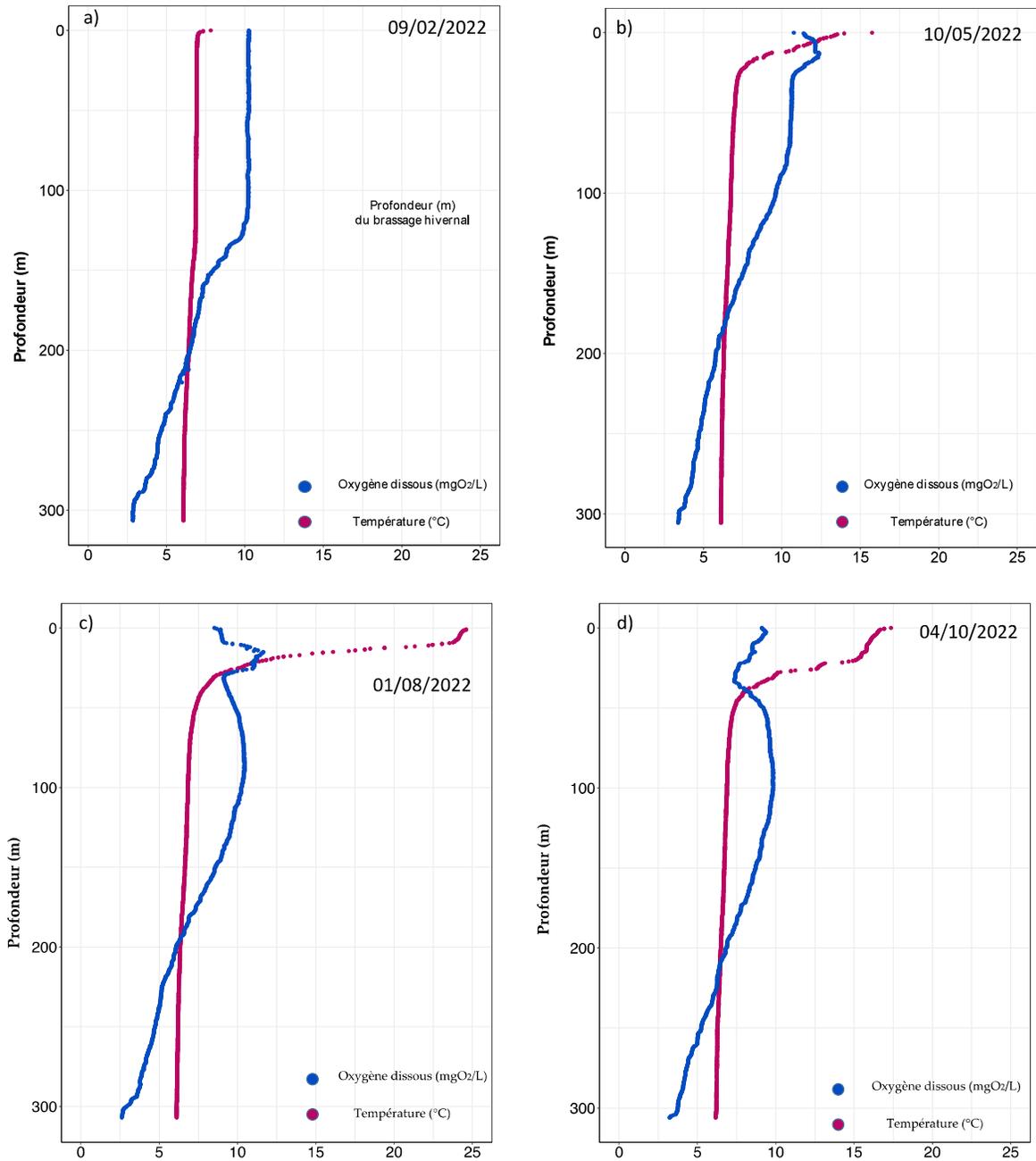


Figure 4 Profil physico-chimique réalisé à l'aide de sondes multi-paramètres, Léman - Grand Lac (SHL2) :

- a) en hiver lors du brassage partiel maximal observable (09.02.2022),
- b) au printemps (10.05.2022),
- c) en été (01.08.2022),
- d) en automne (04.10.2022).

Figure 4 Physico-chemical profile from multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2):

- a) in winter after maximal observable water mixing (09.02.2022),
- b) in spring (10.05.2022),
- c) in summer (01.08.2022),
- d) in autumn (04.10.2022).

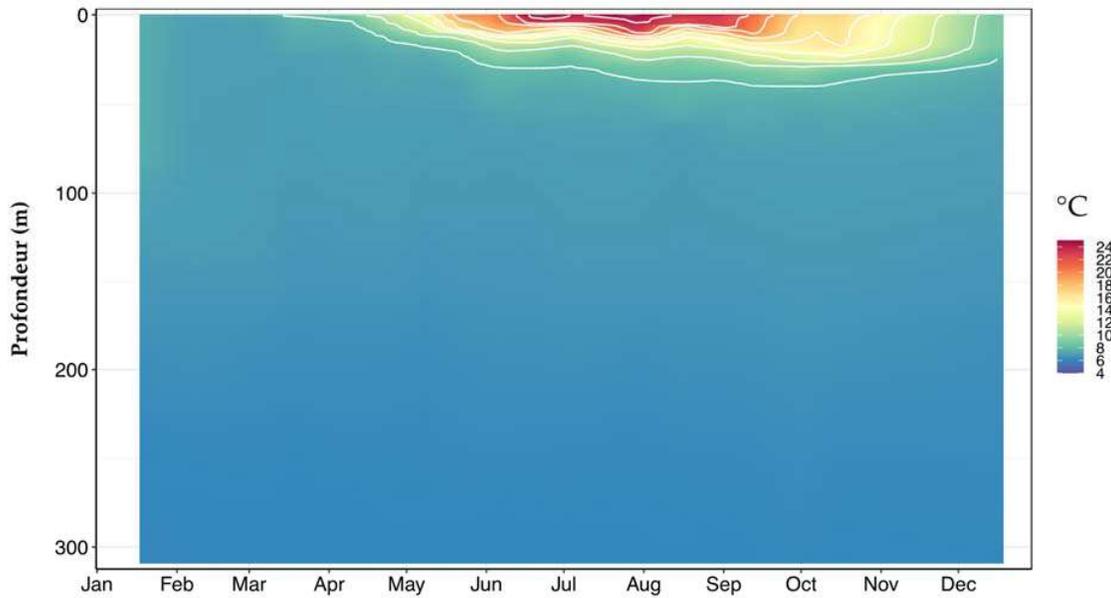


Figure 5 Température des eaux du lac en 2022 (iso-contour en blanc), Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 5 Water temperature in the lake in 2022 (iso-contour lines in white), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

Une augmentation des températures de l’hypolimnion a été observée le 04 octobre 2022. La différence de température par rapport à la campagne précédente, sur la couche entre 250 m et 309 m, est de l’ordre de 0.06°C (Figure 6).

Ce réchauffement pourrait s’expliquer par deux phénomènes conjoints : l’upwelling pélagique déclenché par la grande gyre cyclonique qui se forme occasionnellement autour de SHL2 et l’enfoncement et la fluctuation de la thermocline durant cette période (N. Peng and D. A. Barry. 2022.Communication personnelle.)

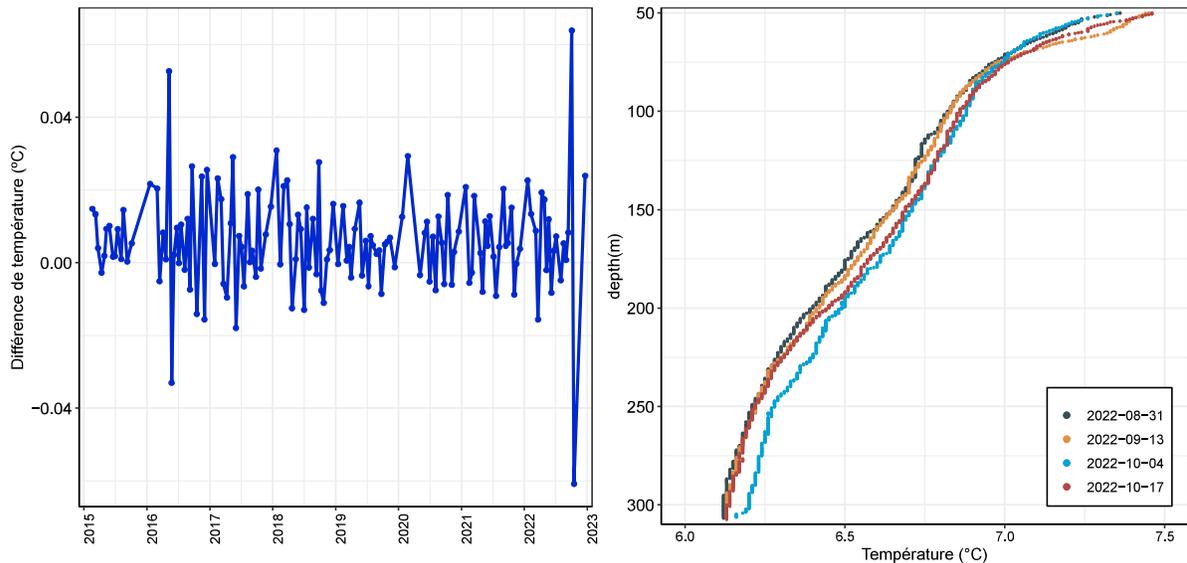


Figure 6 Évolution interannuelles des différences de température moyenne dans l’hypolimnion profond (250m-309m) entre deux campagnes successives depuis 2015 (gauche) et profils des températures entre 50 et 300 mètres pour les 4 campagnes d’août à octobre 2022 (droite).

Figure 6 Long-term changes in the difference of average temperature in the deep hypolimnion (250m-309m) between two successive campaigns since 2015 (left). Vertical profiles of temperature between 50m and 300m for the 4 campaigns from August to October 2022 (right).

2.2. VARIATION INTERANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU

La variation interannuelle de la température à 5m et 309m est présentée dans la figure 6. La variabilité de la couche d'eau de surface est plus marquée que la couche d'eau à 309 m. Les dernières années ont connu les températures de surface les plus élevées dans la chronique des données.

Dans la couche d'eau profonde, la température de l'eau est passée de 5.1 °C en 2012 à 6.1 °C en 2022, soit une augmentation de 1°C en 10 ans. Cette hausse de température s'explique par l'absence de brassage hivernal complet (Figure 7).

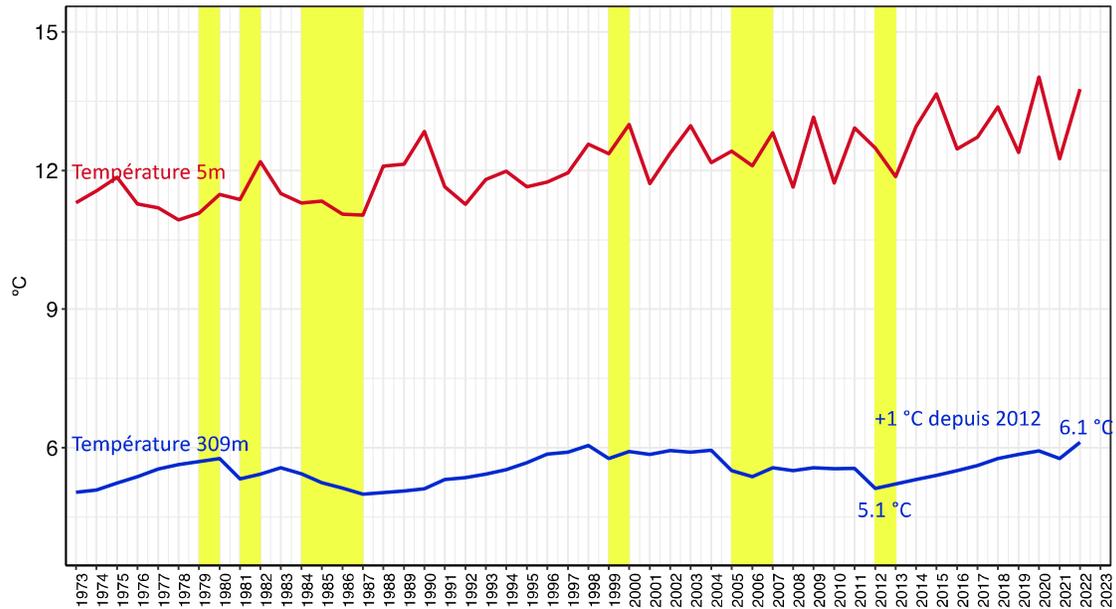


Figure 7 Évolution de la température moyenne annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 5 et 309 m de 1973 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les hivers qui ont conduit à une homogénéisation de la colonne d'eau (soit par l'effet de mélange convective ou d'écoulements de densité).

Figure 7 Inter-annual changes in annual mean water temperature in the lake at depths of 5 and 309 meters from 1973 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent winters when the water column has been homogeneized (due to convective mixing and density currents).

La température moyenne annuelle dans la couche 0-10 m montre une tendance au réchauffement statistiquement significative depuis 1973 (p-value < 0.005) (Figure 8). En 2022, la température de cette couche est de 13.8°C, soit du même ordre de grandeur que l'année 2020 qui est la deuxième année la plus chaude enregistrée en France.

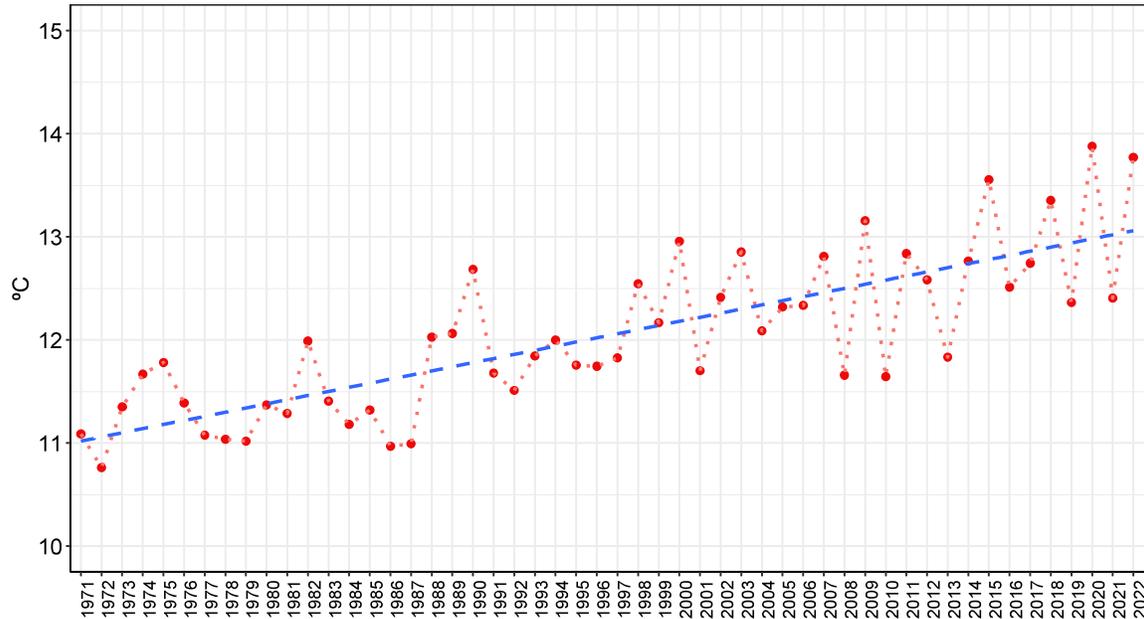


Figure 8 Évolution de la température moyenne annuelle de l'eau de la couche 0-10m de 1973 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 8 Inter-annual changes in the annual average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

3. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ASSOCIE À L'ACTIVITE PHYTOPLANCTONIQUE

3.1. TRANSPARENCE DE L'EAU

La dynamique de transparence pour l'année 2022 est représentée sur la figure 9. En général, la transparence de l'année 2022 est nettement plus importante qu'en 2021.

La transparence est de 13.2 m le 08 mars 2022. Par la suite, la reprise de l'activité photosynthétique, conduit à l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique et provoque une diminution progressive de la transparence, jusqu'à une valeur de 6 m le 10 mai 2022.

Après cette date, la transparence augmente à 11.4 m en raison de la baisse de l'abondance de la communauté phytoplanctonique alors fortement broutée par le zooplancton. La transparence est de 7.5 m le 17 août et diminue à 6.6 m en octobre 2022. Enfin, sur la dernière partie de l'année, la transparence augmente progressivement et atteint 13.2 m le 20 décembre 2022 (Figure 9).

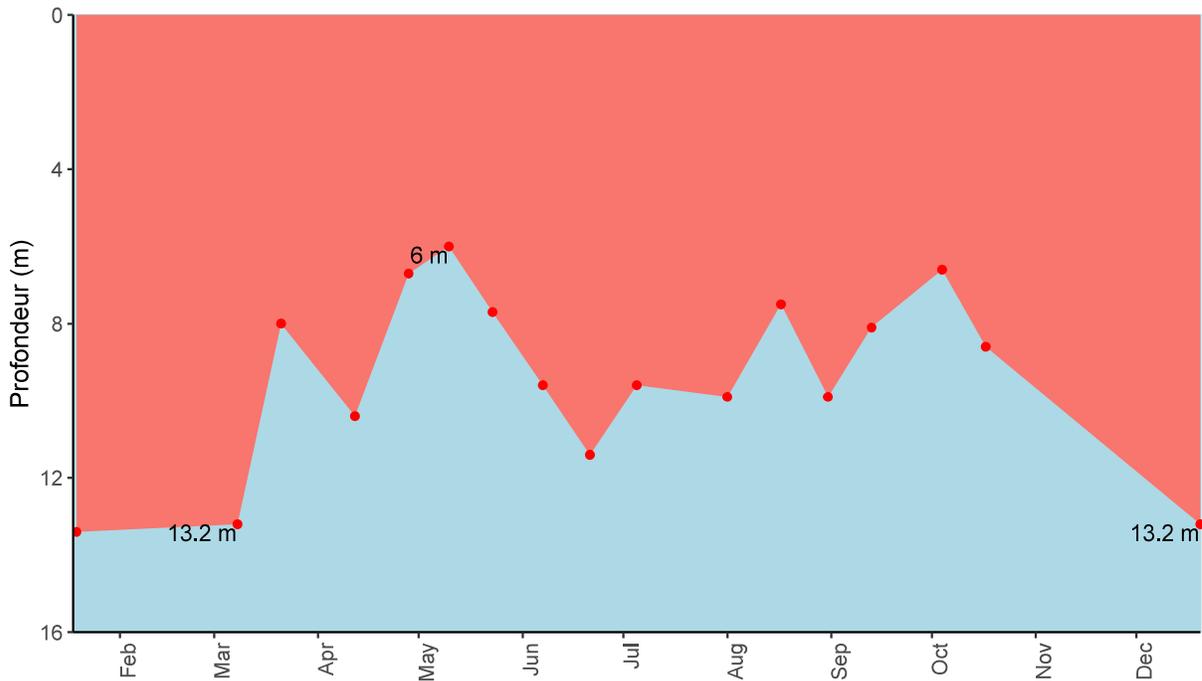


Figure 9 Transparence avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 9 Transparency using a Secchi disk, Léman - Grand Lac (SHL2)

3.2. PH

Le pH dépend de la température, par conséquent, cette mesure est corrigée puis exprimée par convention à 25°C.

La figure 10 représente l'évolution saisonnière du pH dans la colonne d'eau du lac. À l'issue du brassage hivernal qui s'est étendu jusqu'à 130 m, le pH de la colonne d'eau oscille entre 7.5 et 8.5 (Figure 10).

En présence des conditions propices (lumière et température), la reprise de l'activité phytoplanctonique printanière provoque une augmentation du pH dans les premiers mètres de la colonne d'eau habituellement dès le début du printemps. Cette hausse est provoquée par la consommation de CO₂ lors de la photosynthèse. Le CO₂ étant consommé, l'équilibre acido-basique du milieu est modifié et le pH augmente. Durant l'été, le pH reste élevé dans les dix premiers mètres. Le pH diminue progressivement par la suite et le pic du pH s'enfonce en raison de la déstratification de la masse d'eau et de la diminution de l'activité phytoplanctonique à partir de l'automne.

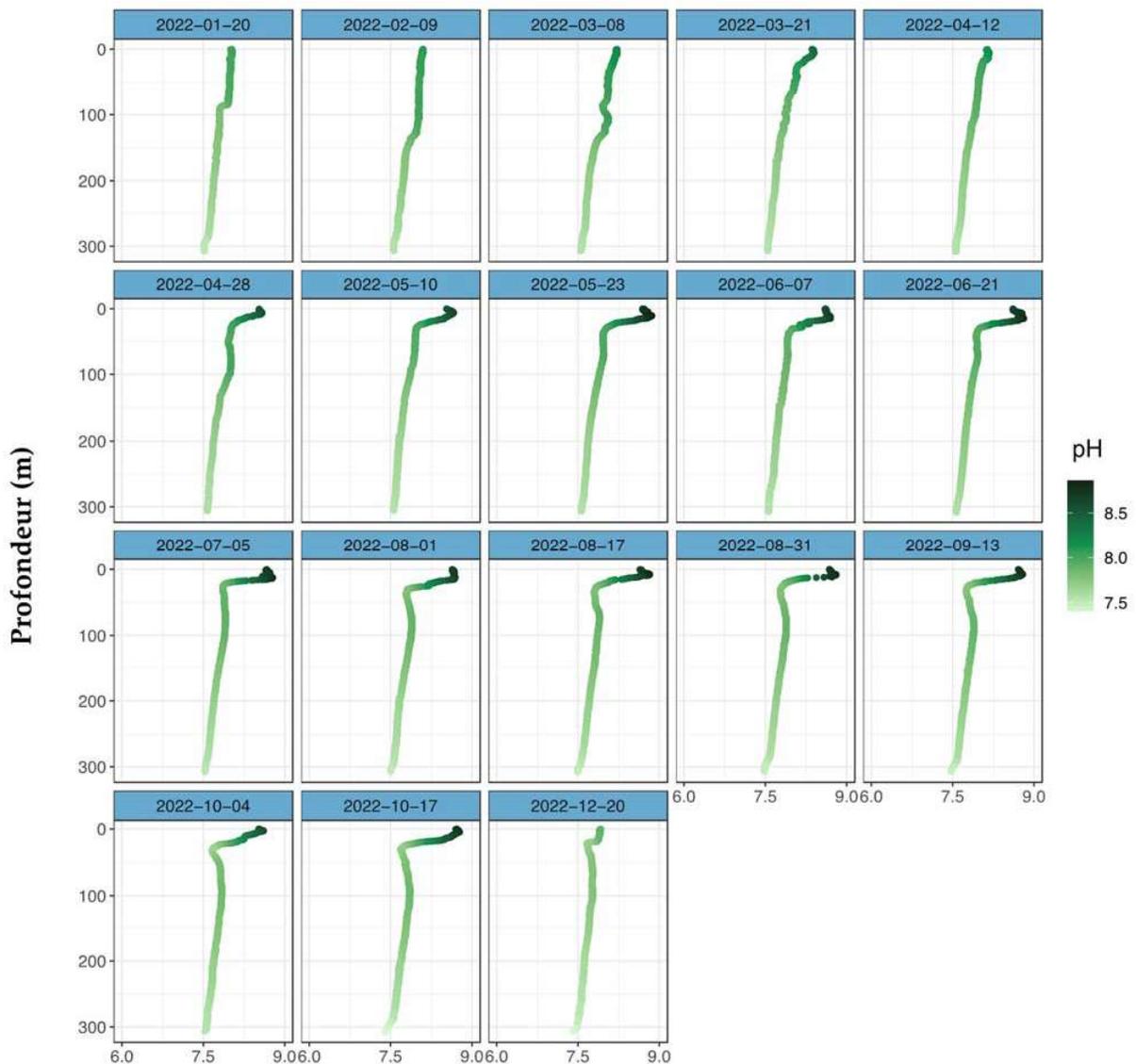


Figure 10 pH des eaux du lac en fonction de la profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 10 Vertical profiles of pH, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

3.3. OXYGENE DISSOUS

La figure 11 montre l'évolution des profils de saturation en oxygène dans la colonne d'eau du lac entre 0 et 30 m.

L'activité phytoplanctonique printanière engendre une sursaturation en oxygène à la surface qui atteint un pic de 152 % à 9.6 m le 23 mai 2022. Par la suite, l'oxygène dissous dans la couche d'eau superficielle reste en sursaturation jusqu'à l'été. À partir de l'automne, l'oxygène dans la couche 0-30 m diminue progressivement à cause de la baisse de l'activité photosynthétique. Ce phénomène peut aussi s'expliquer par la diffusion d'oxygène vers la couche d'eau inférieure qui est désoxygénée du fait de l'activité bactérienne qui y règne et du dégazage vers l'atmosphère lors de la sursaturation en oxygène dissous de l'épilimnion. Durant cette période, l'enfoncement de la thermocline se met en place. La diminution des concentrations en oxygène dissous de l'épilimnion induite par le transfert d'oxygène vers la couche d'eau plus profonde est observée avec un minimum à environ 60 % à 20 m durant le reste de l'année.

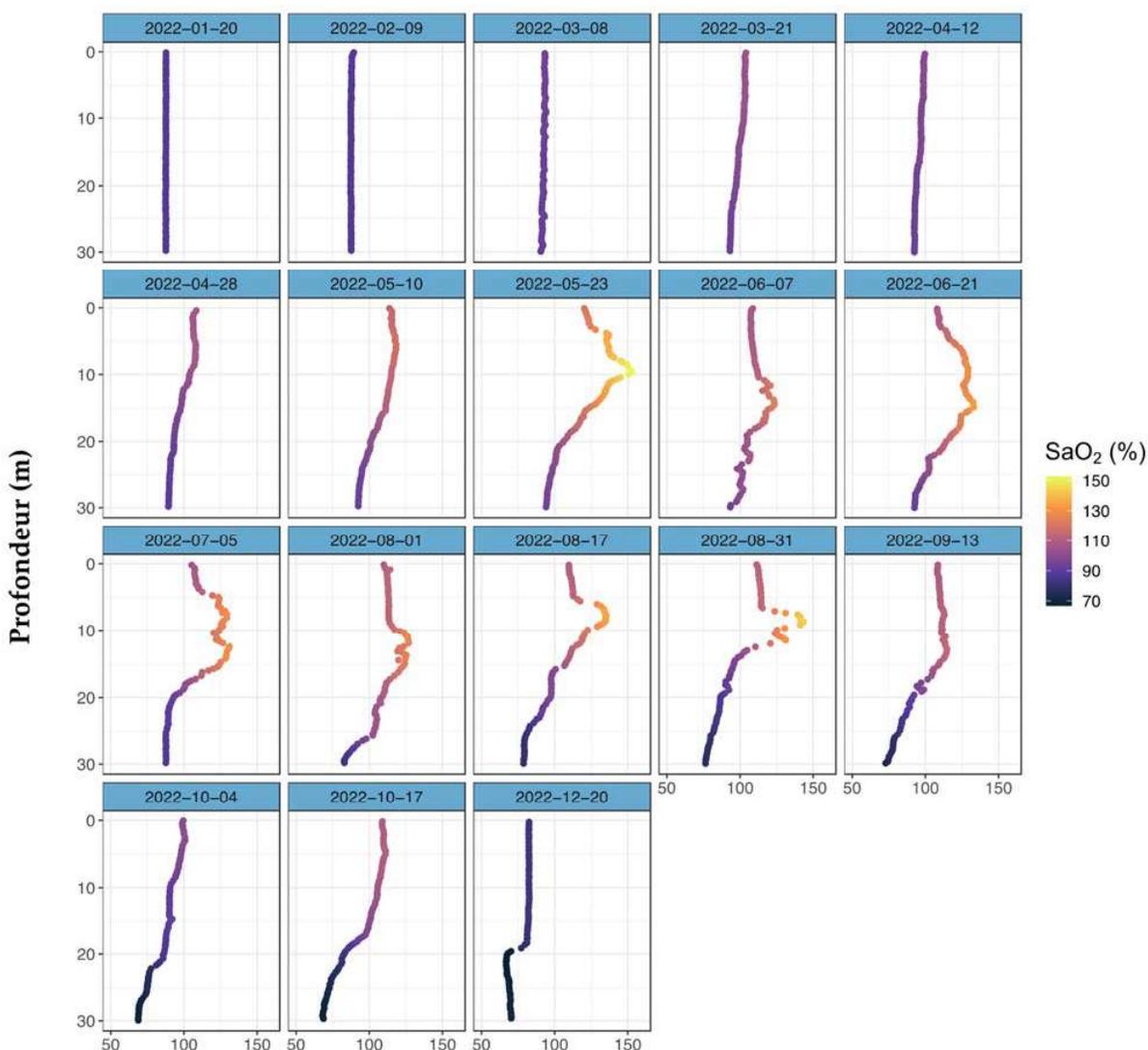


Figure 11 Saturation en oxygène dissous entre 0 et 30 m de la colonne d'eau, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 11 Saturation of dissolved oxygen between 0 and 30 m of lake's water column, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

En 2022, le brassage hivernal ne permet pas de redistribuer l'oxygène dissous dans l'ensemble de la colonne d'eau. À l'issue de ce brassage, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est de 2.3 mgO₂/L. Cette concentration est inférieure à la valeur minimale de 4 mgO₂/L relative aux exigences sur la qualité des eaux en Suisse. Les concentrations demeurent inférieures au seuil de 4 mgO₂/L toute au long de l'année 2022.

L'Annexe 2 de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 stipule pour les lacs que : "La teneur en oxygène de l'eau ne soit, à aucun moment et à aucune profondeur, inférieure à 4 mg/l O₂; elle doit en outre suffire pour que les animaux moins sensibles, tels que les vers, puissent peupler le fond du lac durant toute l'année et en nombre aussi proche que possible de la densité naturelle. Les conditions naturelles particulières sont réservées."

La figure 12 présente la distribution de concentration en oxygène dissous à 309 m. De manière générale, les brassages complets montrent un effet bénéfique en termes d'oxygène dissous pour le lac. Le cas du brassage complet en 2012 illustre ce phénomène, avec une recharge en oxygène (>4 mg/L) jusqu'au fond du lac. Mais depuis cette date, l'absence de brassage complet a conduit à un maintien des concentrations d'oxygène au fond du lac inférieur au seuil de 4 mg/L depuis 2016. En 2022, la répartition des concentrations en oxygène à 309 m est comprise dans une faible gamme de variation : 1.6 mgO₂/L (1^{er} quantile) et 2.5 mgO₂/L (3^{ème} quantile). La valeur maximale est de 3 mgO₂/L. La valeur minimale est de 0.9 mgO₂/L, soit la concentration la plus faible depuis 2012.

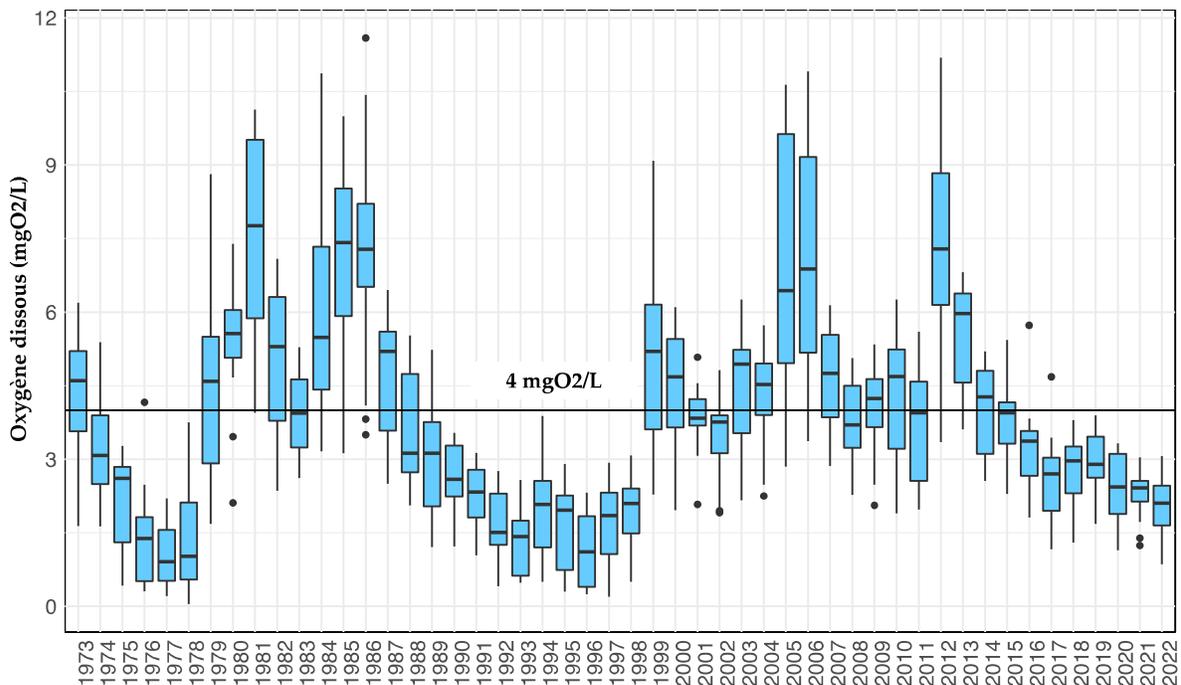


Figure 12 Évolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux à 309 m de 1972 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 12 Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

La désoxygénation de la couche d'eau profonde entraînerait plusieurs phénomènes propres aux conditions réductrices en situation d'anoxie : la réduction de certains métaux comme le manganèse et le fer, la formation d'azote ammoniacal, le relargage de phosphore à partir des sédiments et des eaux interstitielles. Ces phénomènes induisent la remise en solution dans l'eau des éléments liés aux sédiments qui sont solubles en conditions réduites, notamment la silice présente dans les eaux interstitielles et les sédiments.

3.4. MATIÈRE PARTICULAIRE

La matière particulaire dans la couche d'eau superficielle est en partie composée de cellules phytoplanctoniques, il s'agit donc d'un indicateur de l'abondance phytoplanctonique en suspension dans l'eau. Les concentrations en carbone organique particulaire (COP) correspondent donc essentiellement à la quantité en carbone contenue dans l'ensemble du phytoplancton. Les éléments nutritifs étant consommé par le phytoplancton, le phosphore évolue inversement aux abondances de phytoplancton et de carbone organique particulaire (COP).

Ainsi, le premier pic printanier du carbone organique particulaire est observé au mois de mai 2022 avec un pic à 10 m (Figure 13). Le deuxième pic plus marqué du carbone organique particulaire est observé au mois de juin à 20 m. Les deux premiers pics du carbone organique correspondent aux périodes où la biomasse phytoplanctonique est importante.

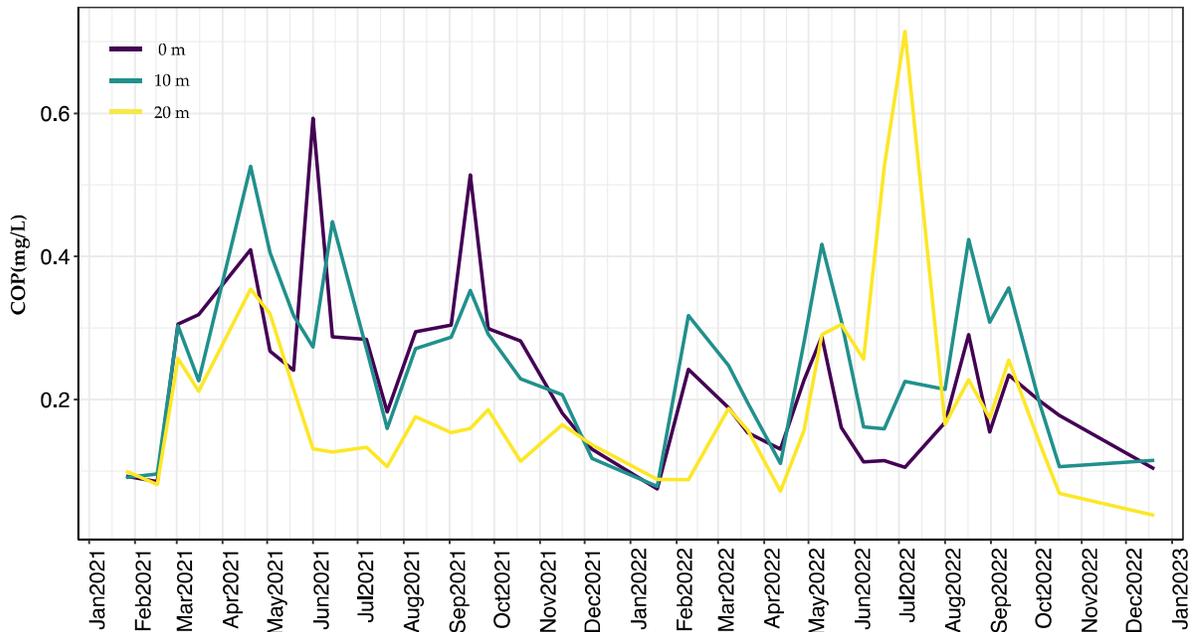


Figure 13 Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches de 0, 10 et 20 m, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 13 Concentration of particulate organic carbon in lake's water surface layers (0, 10, and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Les figures 14 a, b et c mettent respectivement en évidence la dynamique annuelle de la matière particulaire : COP, azote organique particulaire (NOP) et le phosphore particulaire (Ppart). Le carbone organique particulaire et l'azote organique particulaire ne présentent pas de tendance d'évolution particulière depuis l'année 2012. Le phosphore particulaire semble montrer une diminution au cours de cette série temporelle depuis l'année 2008.

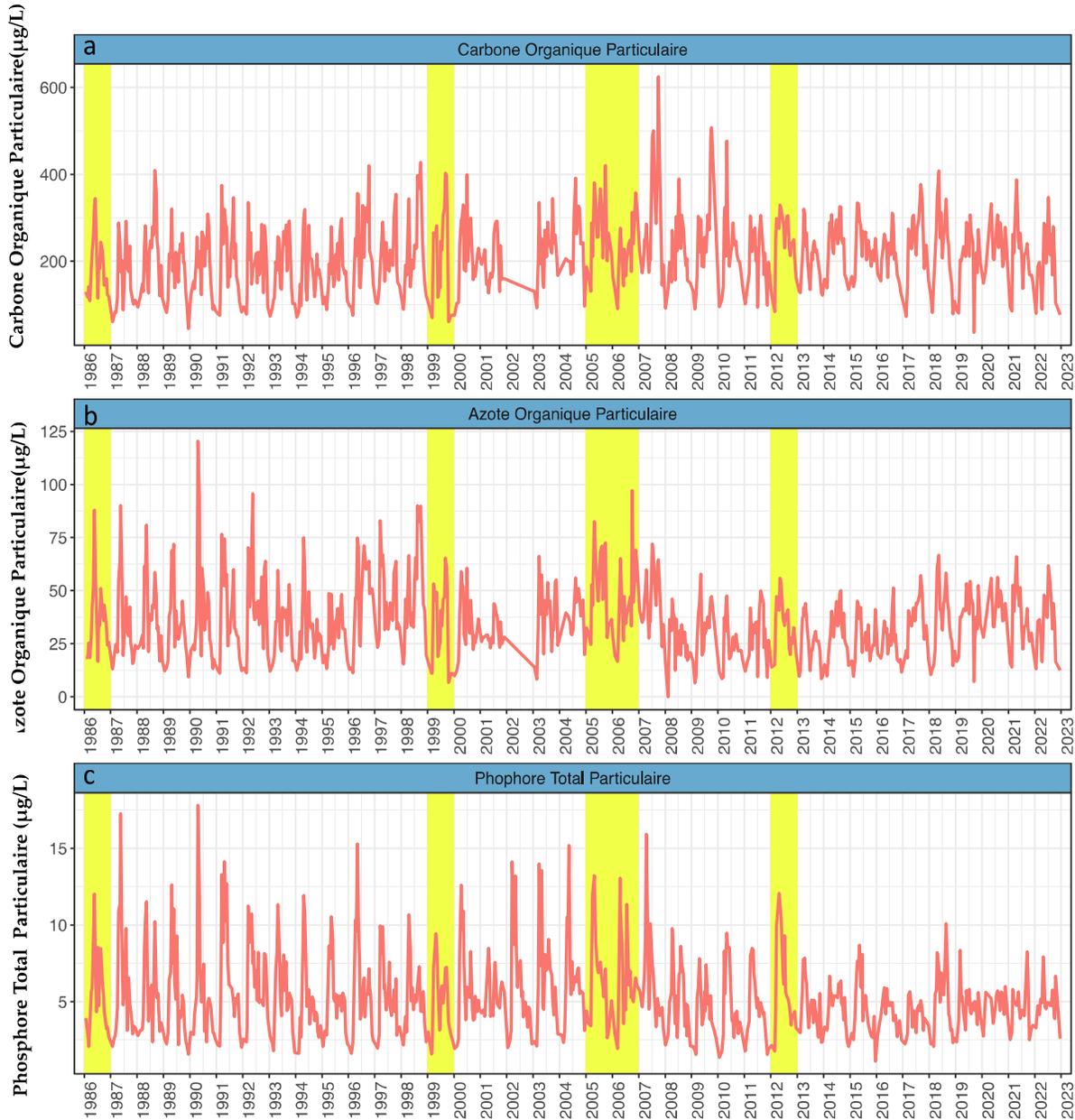


Figure 14 Évolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche 0 - 20 m de 1986 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2) :

- a) Carbone organique particulaire,
- b) Azote organique particulaire,
- c) Phosphore total particulaire

Figure 14 Temporal change in particulate matter concentrations in the 0 - 20 m layer from 1986 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

- a) Particulate organic carbon,
- b) Particulate organic nitrogen,
- c) Particulate total phosphorus

La carence en phosphore disponible pour les cellules algales est souvent observée pendant la période estivale. La figure 15 décrit le rapport N:P entre 1986 et 2022 qui traduit une carence en phosphore quand ce rapport est supérieur à 7, en se référant à la stœchiométrie de la réaction globale de la photosynthèse (Pourriot et Meybeck, 1995). Selon la théorie du « Facteur limitant », une baisse de phosphore aura un effet notable sur l'abondance du phytoplancton dès lors que ce rapport est supérieur à 7. L'année 2022 indique une carence en phosphore pour plus de la moitié des échantillons et similaire à celle observée en 2021.

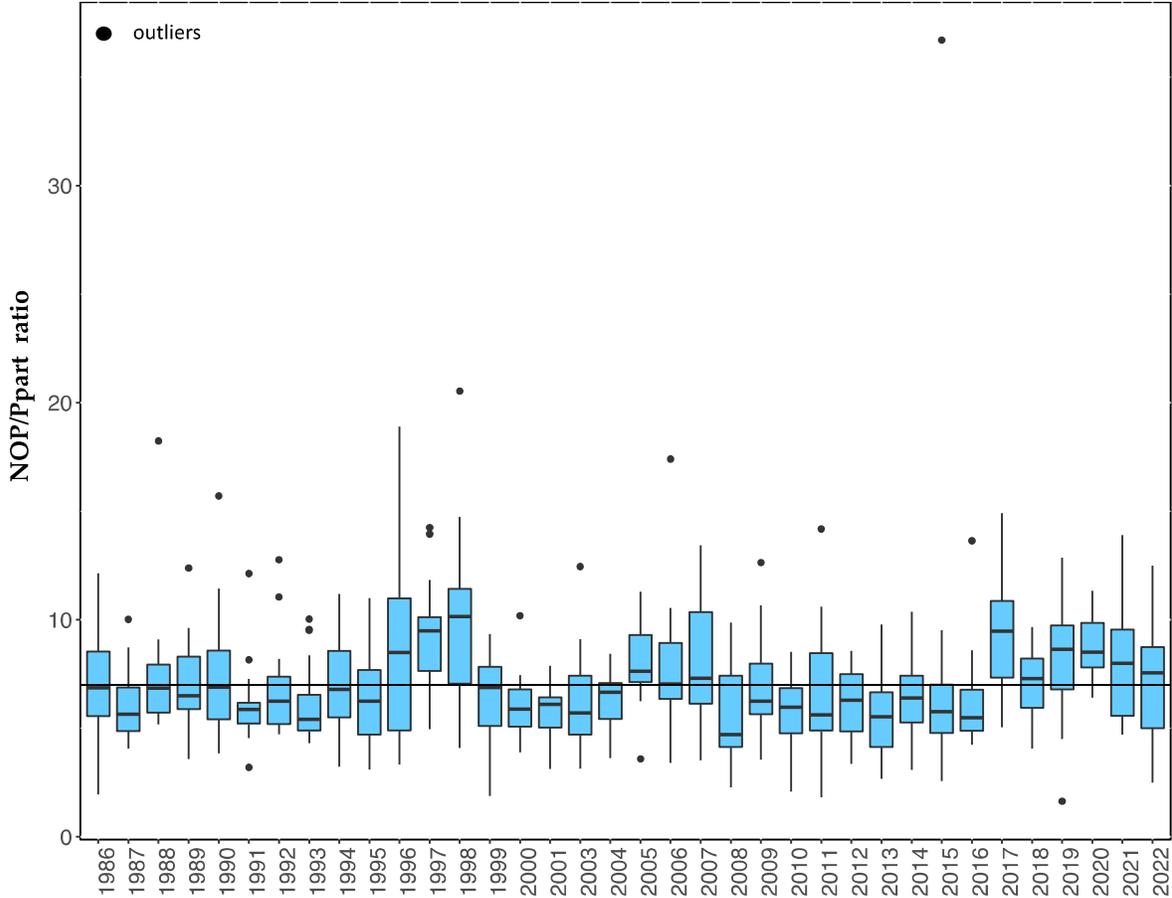


Figure 15 Évolution du rapport Azote organique particulaire/ Ppart dans l'eau de la couche (0 - 20 m de 1986 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 15 Change in NOP / Ppart ratio in the 0-20m layer from 1986 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4. ELEMENTS NUTRITIFS ET CHLORURES

4.1. PHOSPHORE TOTAL ET ORTHOPHOSPHATES

Le brassage hivernal des eaux du Léman a deux effets pour l'écosystème du lac : réoxygénation des eaux profondes et remise à disposition des nutriments dans la colonne d'eau à partir de la charge interne (quantité des nutriments remobilisables dans un lac souvent en lien avec le brassage hivernal) présente dans l'hypolimnion profond (250-309m). Or, l'hiver 2022 n'a pas permis un brassage complet, par conséquent les nutriments n'ont pas été redistribués de manière homogène tout le long de la colonne d'eau (Figure 16).

La figure 16 représente la moyenne pondérée des orthophosphates ($P-PO_4^{3-}$) de la couche 0 - 30 m et des eaux profondes (250-309 m) de 1981 à 2022. Dans la couche 0-30 m, l'amplitude de la variabilité saisonnière des orthophosphates est plus importante avant les années 90. Cette amplitude diminue nettement au cours du temps et atteint une concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphates de 3.9 $\mu\text{gP/L}$ dans la couche 0-30 m en 2022.

Dans la couche d'eau profonde (250-309 m), la concentration en orthophosphates présente une modification temporelle sur le long terme. Les dates d'homogénéisation thermique hivernale qui indiquent un brassage complet de la colonne d'eau correspondent à des réductions très marquées de la concentration en orthophosphates mesurée dans la couche d'eau profonde. Depuis 2018, la concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphates présente une légère baisse. En 2022, elle est de 37.3 $\mu\text{gP/L}$. La longueur de la série, nous permet dorénavant de distinguer une dynamique particulière en 3 phases : 1) chute brutale des concentrations en raison du brassage total, 2) augmentation progressive sur plusieurs années en absence de brassage hivernal complet en raison de la minéralisation de la matière organique qui sédimente et 3) une baisse progressive des concentrations dont les raisons restent à déterminer mais sont probablement liées à des processus hydrologiques ou chimiques, voir biochimiques et/ou diagénétique-sédimentaire.

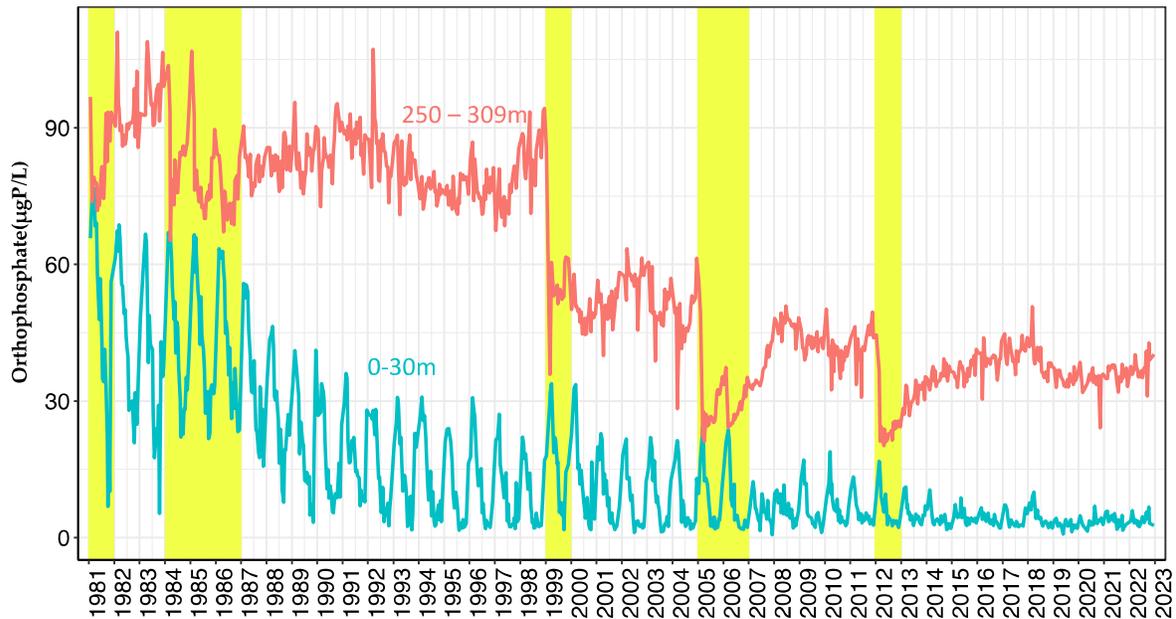


Figure 16 Concentration moyenne pondérée en orthophosphates ($P-PO_4^{3-}$) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2022. Les barres en jaune représentent les hivers qui ont conduit à une homogénéisation de la colonne d'eau (soit par l'effet de mélange convective ou d'écoulements de densité).

Figure 16 Concentration of orthophosphate ($P-PO_4^{3-}$) in the 0-30m layer and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2022. The yellow shades represent winters when the water column has been homogenized (due to convective mixing and density currents).

La figure 17 représente la moyenne pondérée du phosphore total (P-Ptot) dans la couche 0 - 30 m, et des eaux profondes (250-309 m) de 1981 à 2027.

La même observation que pour les orthophosphates est faite pour la concentration en phosphore total, à savoir que la concentration en phosphore total diminuait progressivement dans les 30 premiers mètres et de façon nette au fond après chaque homogénéisation hivernale complète avec une dynamique en 3 temps comme décrite précédemment. La concentration annuelle moyenne pondérée en phosphore total dans la couche 0-30 m en 2021 est de 9.2 µgP/L. La concentration en phosphore totale dans la couche d'eau profonde est de 39.7 µgP/L.

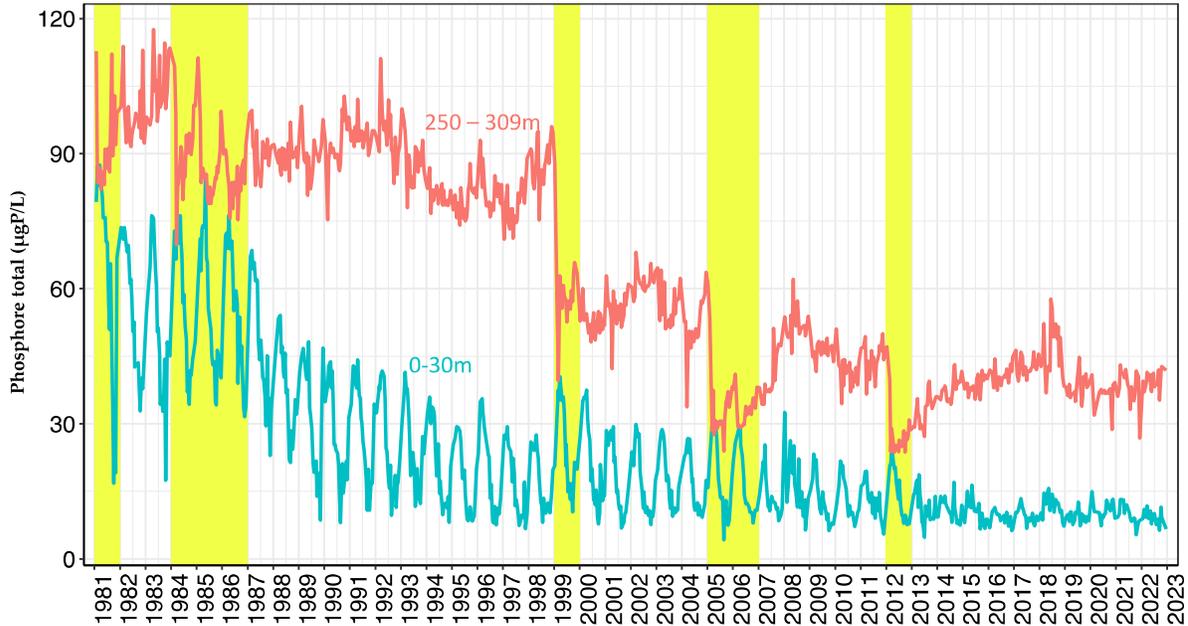


Figure 17 Concentration moyenne pondérée en phosphore totale (P-Ptot) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2022. Les barres en jaune représentent les hivers qui ont conduit à une homogénéisation de la colonne d'eau (soit par l'effet de mélange convectif ou d'écoulements de densité).

Figure 17 Concentration of total phosphorus (P-Ptot) in the 0-30m layers and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2022. The yellow shades represent winters when the water column has been homogenized (due to convective mixing and density currents).

En 2022, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total estimée sur l'ensemble du grand lac est de 16.9 µgP/L, soit une légère augmentation de 0.9 µgP/L par rapport à l'année 2021 (Figure 18). La concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphates est de 13.5 µgP/L en 2021, soit une augmentation de 1.3 µgP/L par rapport à l'année 2021.

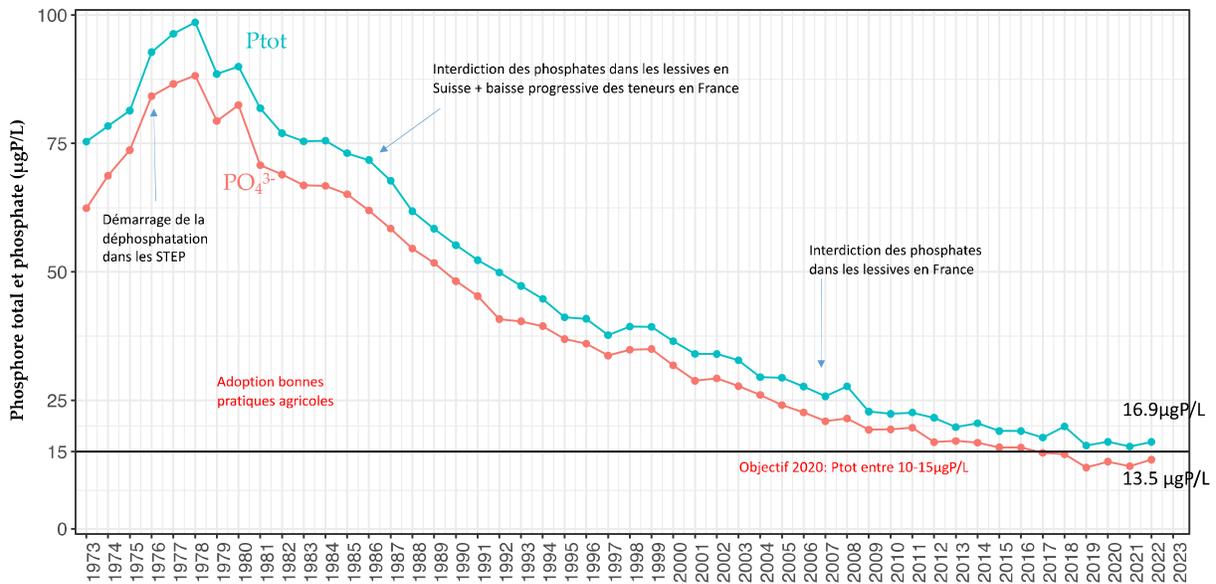


Figure 18 Évolution de la concentration moyenne annuelle pondérée des orthophosphates et de phosphore total estimée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 18 Long-term change in weighted mean annual total concentration of orthophosphate and total phosphorus in the entire mass of lake's water from 1973 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 19 présente la teneur en orthophosphates à 309 m depuis 2012. En raison d'absence du brassage complet depuis cette date, les conditions hypoxiques au fond du lac s'accroissent. En 2022, un probable relargage du phosphore au fond est observé à partir du mois d'août. Les augmentations soudaines de phosphore observées au cours de la chronique (octobre 2017 et 2018, août 2022) pourraient également être dues à l'arrivée, par écoulement de densité, d'une masse d'eau enrichie en nutriment. En Octobre, la concentration en orthophosphates est à 95µgP/L, ce qui représente la valeur la plus élevée depuis le dernier brassage complet en 2012 (Figure 19).

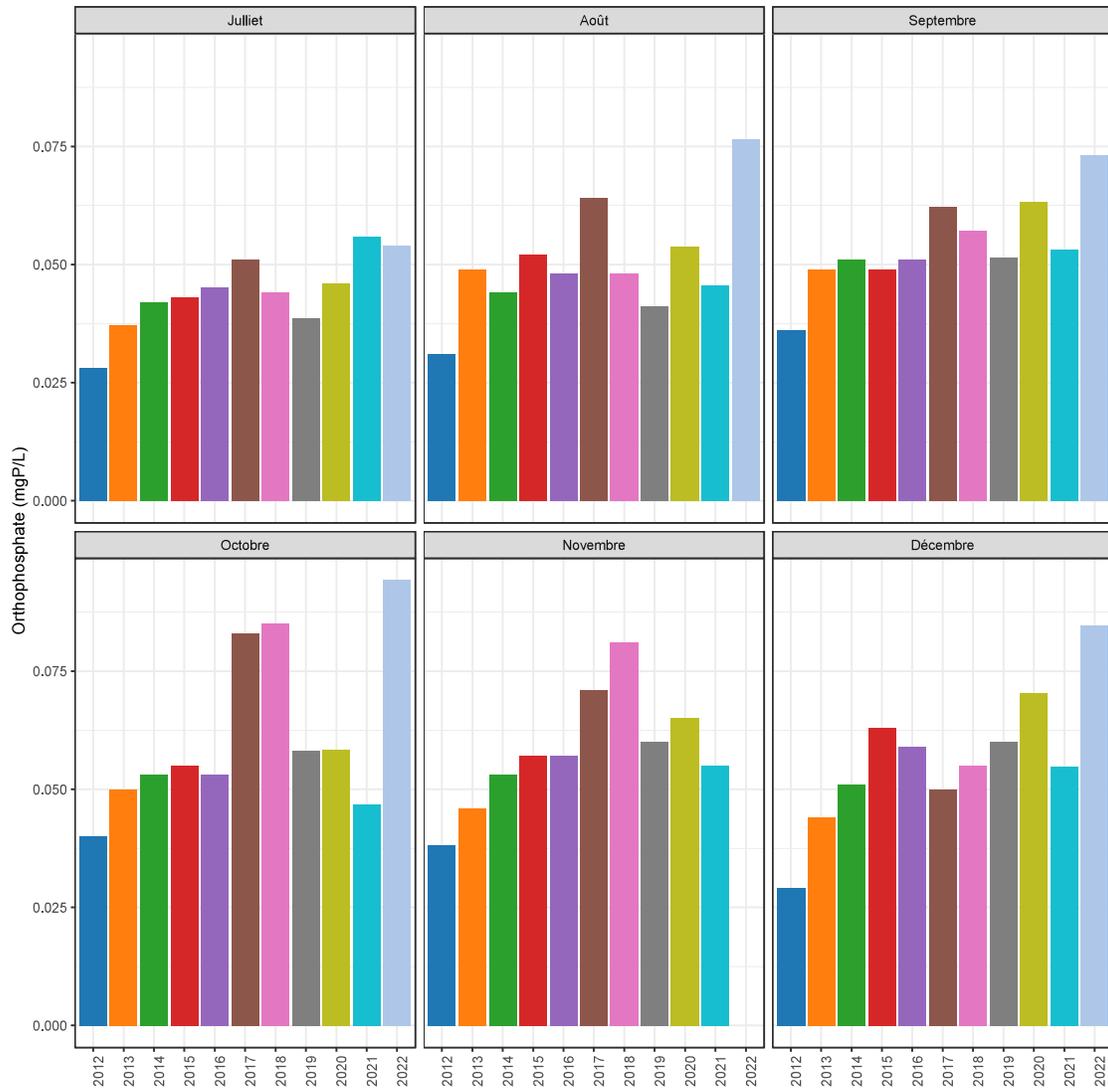


Figure 19 Concentration en orthophosphates à 309m depuis 2012, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 19 Orthophosphate concentration at 309m since 2012, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4.2. AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMMONIACAL

L'azote nitrique ou nitrate est un élément nutritif essentiel au développement des micro-organismes photosynthétiques. L'évolution des concentrations de nitrate à 5 profondeurs discrètes de la couche de surface (0-30m) au cours des 3 dernières années est présentée dans la figure 20. Le brassage hivernal remobilise les nitrates de la couche d'eau plus profonde à la surface. Les concentrations sont maximales en début de l'année. Le développement photosynthétique consomme cette source de nitrate, ce qui diminue la concentration de nitrate entre 0 m- et 15m du printemps à l'été. La teneur en nitrate augmente à partir de l'automne en raison de l'enfoncement de la thermocline. À 30m, les activités photo synthétiques sont limitées; les concentrations de nitrate sont donc plutôt constantes.



Figure 20 Concentration en azote nitrique (N-NO₃⁻) dans l'eau de la couche d'eau superficielle du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 20 Concentration of nitrate (N-NO₃⁻) in surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

En 2022, la concentration moyenne en azote total reste stable par rapport à l'année 2021. La concentration moyenne annuelle en nitrates en 2022 est de 565 µgN/L et reste similaire à celle de 2021 (Figure 19). Les concentrations en nitrates dans les eaux du Léman restent donc conforme à l'exigence de l'ordonnance sur la protection des eaux Suisse qui édicte une limite à 560 µgN/L.

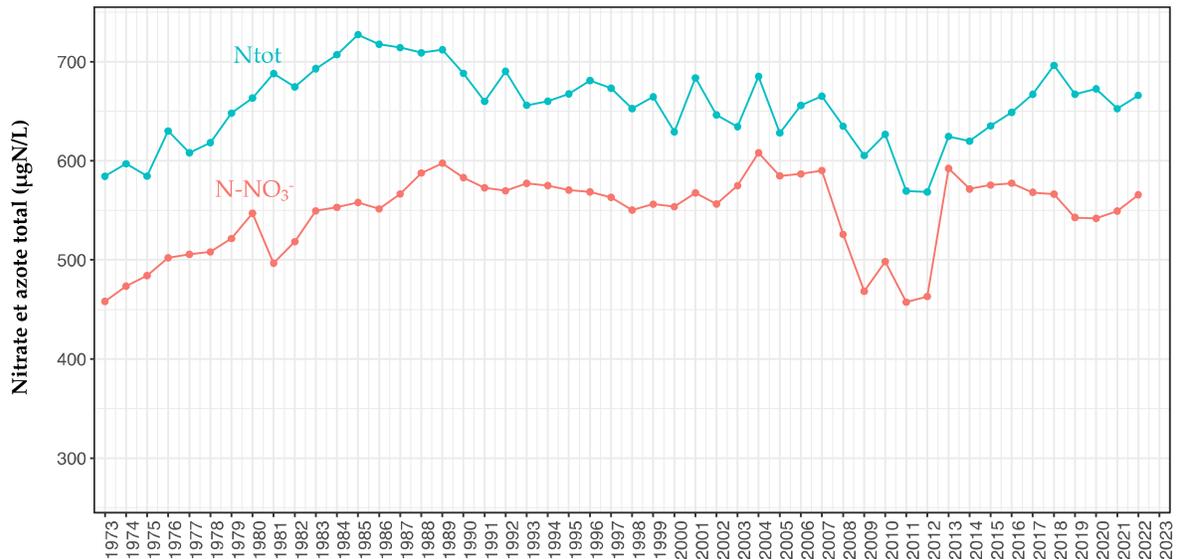


Figure 21 Évolution de la concentration moyenne annuelle pondérée d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 21 Change in the weighted mean annual total concentration of total nitrogen and nitrate in the entire mass of lake's water from 1973 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La concentration en ammonium en 2022 est faible en début de l'année et augmente au fur et à mesure de l'activité zooplanctonique en raison des excréments de ces organismes mais également des poissons et de la dégradation microbienne de la matière organique (RASCONI et al, ce rapport). Ces concentrations en ammonium en hausses sont à corrélérer avec une activité zooplanctonique importante liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période (Figure 22)

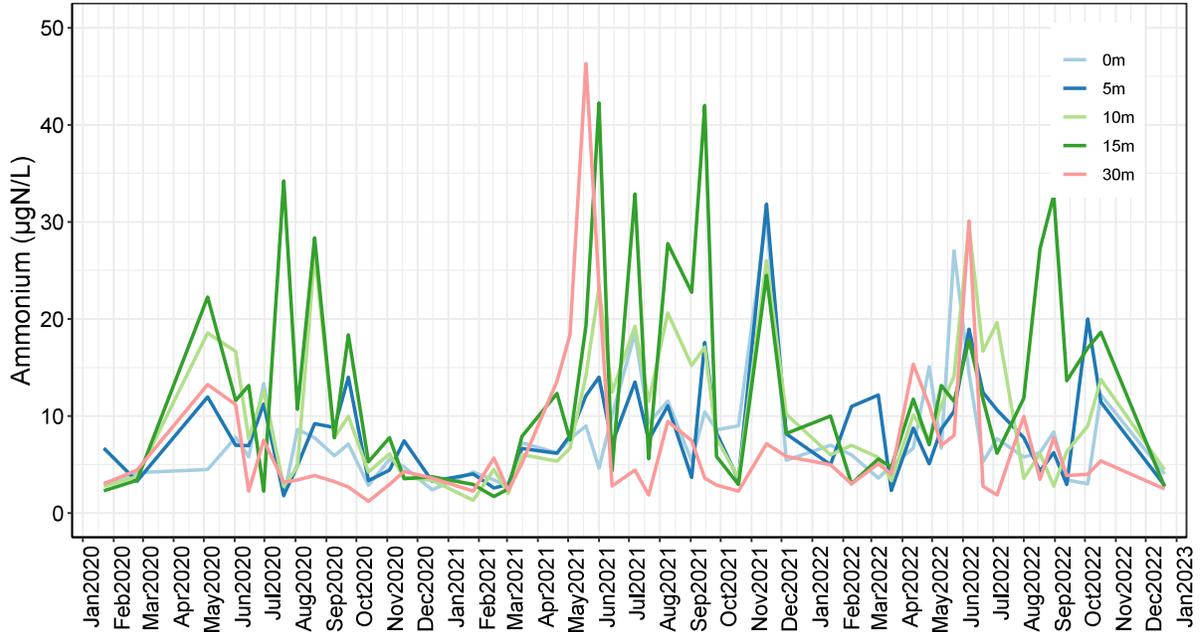


Figure 22 Concentration en azote ammoniacal ($N-NH_4^+$) dans l'eau de la couche d'eau superficielle (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 22 Concentration of ammonium in surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4.3. SILICE

La silice constitue une source nutritive importante pour les diatomées afin de construire leur frustule. La variation saisonnière de silice est souvent en corrélation avec la dynamique de développement des diatomées. Pour la couche d'eau superficielle 0 - 30 m, la plus forte concentration en silice est de 1.12 mgSiO₂/L avant le brassage hivernal. La concentration moyenne annuelle en 2022 est de 0.60 mgSiO₂/L, soit du même ordre de grandeur que l'année 2021.

La concentration en silice diminue progressivement au cours des mois pour atteindre une valeur minimale de 0.27 mgSiO₂/L pendant l'été 2022. À partir de l'automne, la consommation de la silice par le phytoplancton diminue nettement. En parallèle, l'enfoncement de la thermocline s'accompagne d'une remobilisation de la silice présente dans le haut de l'hypolimnion, entraînant une nouvelle hausse des teneurs en silice en surface du lac (Figure 23). Depuis les dernières homogénéisations thermiques complètes en 2005, 2006 et 2012, la silice dans la couche d'eau profonde n'est pas redistribuée dans l'ensemble de la colonne d'eau. Comme pour le phosphore, la concentration en silice diminue nettement dans la couche d'eau profonde après chaque homogénéisation thermique hivernale complète.

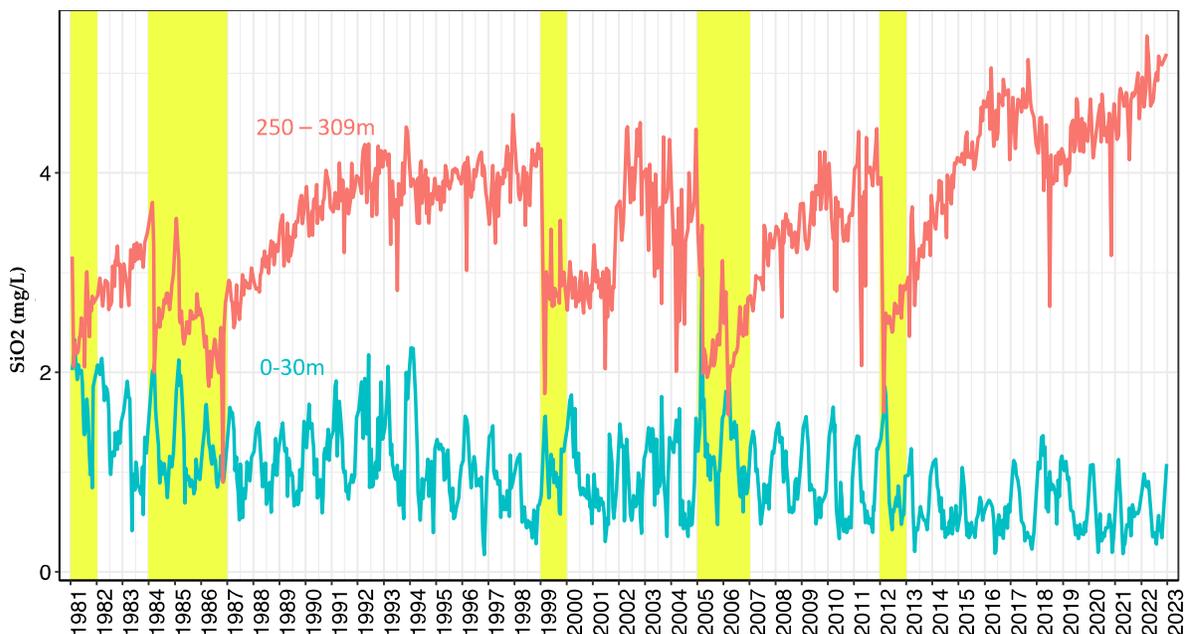


Figure 23 Concentration moyenne pondérée en silice (SiO₂) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 – 309 m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2022. Les barres en jaune représentent les hivers qui ont conduit à une homogénéisation de la colonne d'eau (soit par l'effet de mélange convective ou d'écoulements de densité).

Figure 23 Concentration of silica (SiO₂) in the 0-30m layer and bottom layer (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2022. The yellow shades represent winters when the water column has been homogenized (due to convective mixing and density currents).

4.4. CHLORURE

Les concentrations des ions chlorures dans le Léman sont en constante augmentation de 1973 à 2016 et semblaient s'être stabilisés entre 2016 et 2021 (figure 24). En 2022, le stock de chlorure est égal à 920 000 tonnes, soit une moyenne annuelle pondérée de 10.70 mg/L contre 893 000 tonnes et 10.40 mg/L en 2021. Les apports via les affluents du Léman expliquent une majeure partie de ces teneurs (KLEIN, 2016) qui reflètent une utilisation de produits chimiques à base de chlorure dans le secteur industriel (saline, métallurgie et industrie pharmaceutique ...) et l'usage de sel de déneigement dans le bassin versant du lac (GUMY et DE ALENCASTRO, 2001).

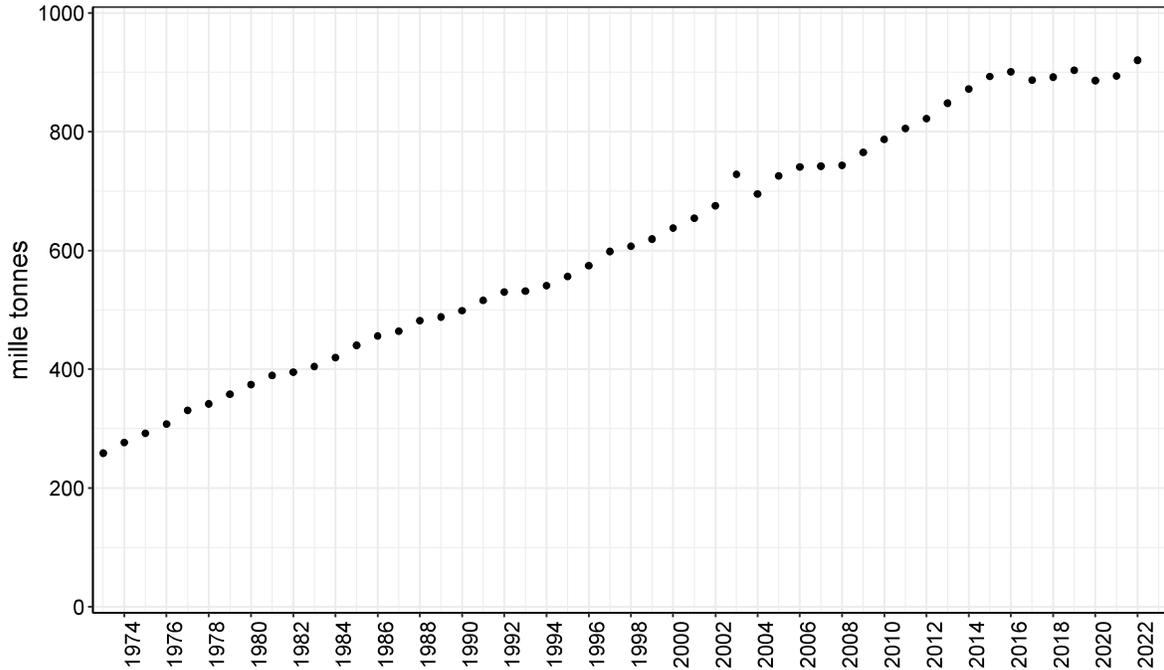


Figure 24 Évolution du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 24 Change in stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1973 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

BIBLIOGRAPHIE

- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- Peng N. and Barry D. A. 2022. Personal communication.
- POURRIOT, Roger et MEYBECK, Michel. Limnologie générale. 1995 - chapitre Production primaire autotrophe p 228 – 252
- RASCONI, S., ANNEVILLE, O., LAINE, L. (2023) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2022.
- RIMET, F. (2023) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2022.
- SCHWEFEL, Robert, GAUDARD, Adrien, WÜEST, Alfred, *et al.* Effects of climate change on deepwater oxygen and winter mixing in a deep lake (Lake Geneva): Comparing observational findings and modeling. *Water Resources Research*, 2016, vol. 52, no 11, p. 8811-8826.
- SOERE OLA-IS, AnaEE-France, INRAE Thonon-les-Bains, 2022, developed by Eco-Informatics ORE INRAE Team

ANNEXES

ANNEXE I

La concentration moyenne pondérée est calculée en prenant en compte le volume de la couche d'eau considérée :

$$C_{moyennepondérée} = \frac{\sum Ci * Vi}{\sum Vi}$$

Avec

Ci : Concentration obtenue des mesures ou analyses du laboratoire à la profondeur d'échantillonnage

Vi : Volume de la strate qui correspond à la profondeur d'échantillonnage

Les volumes des strates qui permettent de calculer les concentrations moyennes pondérées sont présentés ci-dessous.

Tableau 2. Volume des strates des couches d'eau

Table 2. Volume of the strata of the water layers

Partie du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)	Année	Niveau (m)	Volume (km3)	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	1957 - mars 1976	0	1.2388	dès 04.1976 - 1980	0	1.2388	1990-1981	0.0	0.6200
		5	1.8516		5	1.8516		2.5	1.2376
		10	1.2279		10	1.2279		5.0	1.2328
		20	1.8310		20	1.8310		7.5	1.2279
		30	2.4268		30	2.4268		10.0	1.8310
		40	3.5583		40	3.5583		15.0	2.4268
		50	6.7501		50	6.7501		20.0	3.5583
		100	14.2477		100	14.2477		30.0	6.7501
		150	16.5454		150	16.5454		50.0	14.2477
		200	20.0474		200	14.0402		100.0	23.5655
		250	13.3846		225	12.0143		200.0	19.0344
		300	2.5840		250	6.0745		250.0	6.0745
					275	2.6058		275.0	1.6991
					309	1.2811		280.0	0.4539
								285.0	0.4134
								290.0	0.3821
								295.0	0.3628
								300.0	0.3034
								305.0	0.2451
								309.0	0.0271

Partie du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km3)	Année	Niveau (m)	Volume (km3)	Année	Niveau (m)	Volume (km3)
Grand Lac	1992-1991	0.0	0.6200	2001-1993	0	0.6200	dès 2002	0	0.6200
		2.5	1.2376		2.5	1.2376		2.5	1.2376
		5.0	1.2328		5	1.2328		5	1.2328
		7.5	1.2279		7.5	1.2279		7.5	1.2279
		10.0	1.8310		10	1.8310		10	1.8310
		15.0	2.4268		15	2.4268		15	2.4268
		20.0	3.5583		20	3.5583		20	2.3722
		30.0	6.7501		30	6.7501		25	2.3111
		50.0	14.2477		50	14.2477		30	2.2500
		100.0	16.5454		100	16.5454		35	4.3928
		150.0	14.0402		150	14.0402		50	13.2300
		200.0	12.0143		200	12.0143		100	16.5454
		250.0	6.0745		250	6.0745		150	14.0402
		275.0	1.6991		275	2.1530		200	12.0143
		280.0	0.4539		290	0.9769		250	6.0745
		285.0	0.4134		300	0.4848		275	2.1530
		290.0	0.3821		305	0.2451		290	0.9769
		295.0	0.3628		309	0.0271		300	0.4848
		300.0	0.3034					305	0.2451
		305.0	0.2451					309	0.0271
		309.0	0.0271						

ANNEXE II

Tableau 3 Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2). Calcul à partir des données extraites de la SOERE SI-OLA selon les coefficients de pondérations dans l'annexe I

Table 3 Mean annual weighted concentrations from 1957 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). Calculation based on database extracted from, SOERE OLA-IS according to ponderation coefficient in Annexe I

Année	Oxygène	Ptot	PO ₄ ³⁻	Ntot	Σ Nmin	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	COP	NOP	Ppart	Transparence	Transparence
	mg·L ⁻¹	µgP·L ⁻¹	µgP·L ⁻¹	µgN·L ⁻¹	µgN·L ⁻¹	µgN·L ⁻¹	µgN·L ⁻¹	mgCl·L ⁻¹	µgC·L ⁻¹	µgN·L ⁻¹	µgP·L ⁻¹	12 mois	mai-septembre
												mètre	mètre
1973	8.78	75.36	62.39	584.40	466.94	7.39	458.60	3.01					
1974	8.14	78.39	68.72	597.00	484.80	10.64	473.96	3.22				8.46	5.98
1975	7.96	82.51	73.76	607.69	503.41	7.88	495.07	3.40				7.30	3.78
1976	7.22	91.33	82.17	617.11	513.46	8.80	504.64	3.58				8.18	4.00
1977	7.05	96.35	86.57	608.13	513.05	6.59	505.57	3.85				7.95	5.18
1978	7.55	98.56	88.20	618.18	515.47	21.17	508.11	3.97				7.27	5.64
1979	8.48	88.52	79.38	648.04	528.35	5.87	521.57	4.16				10.42	5.86
1980	8.30	89.96	82.50	663.31	554.25	6.14	547.20	4.35				8.88	6.04
1981	9.37	81.85	70.80	687.95	506.76	9.01	496.75	4.53				8.10	5.82
1982	9.27	76.99	68.96	674.52	528.10	8.64	518.31	4.60				7.28	5.53
1983	9.16	75.42	66.86	692.93	561.01	10.25	549.51	4.70				7.86	6.35
1984	9.52	75.56	66.73	707.01	565.35	11.33	553.01	4.88				7.35	5.58
1985	9.53	73.09	65.11	727.24	572.04	13.54	557.96	5.12			3.19	8.28	4.94
1986	9.83	71.80	61.96	717.64	558.88	6.77	551.31	5.30	110.4	18.97	3.06	7.50	4.32
1987	9.62	67.75	58.42	714.05	573.85	6.58	566.48	5.40	71.9	13.91	2.93	8.01	4.71
1988	9.33	61.82	54.55	708.89	593.73	5.37	587.52	5.60	115.3	17.17	2.62	7.18	5.19
1989	8.64	58.41	51.76	711.99	604.15	5.76	597.65	5.67	93.2	14.23	2.11	10.02	6.21
1990	8.34	55.21	48.21	688.11	589.61	5.65	583.02	5.80	100.9	16.07	2.45	7.94	6.07
1991	8.49	52.27	45.29	659.85	579.60	5.94	572.72	6.00	91.5	15.08	2.55	7.84	5.86
1992	8.42	49.89	40.81	690.27	576.37	5.44	569.73	6.16	91.2	17.67	2.81	6.77	5.20
1993	8.29	47.27	40.40	655.96	581.32	3.27	577.19	6.18	88.1	13.32	2.32	8.23	5.42
1994	8.33	44.76	39.44	659.88	580.01	4.05	575.04	6.29	83.6	14.04	2.17	7.10	5.87
1995	8.22	41.18	36.94	667.46	575.08	3.48	570.44	6.47	88.2	12.75	2.21	7.67	5.89
1996	8.27	40.88	36.02	680.93	574.17	4.46	568.64	6.68	107.4	22.32	2.31	7.17	4.56
1997	8.41	37.68	33.69	673.22	568.32	4.20	563.06	6.96	107.4	23.12	2.19	8.17	6.73
1998	8.25	39.35	34.84	652.72	556.54	8.52	550.35	7.06	103.1	23.05	2.22	6.98	5.65
1999	8.72	39.30	34.98	664.45	560.48	3.86	556.21	7.20	93.0	13.24	2.28	8.10	5.72
2000	9.09	36.51	31.81	629.10	557.97	4.46	553.71	7.42	109.8	14.74	2.47	7.58	5.35
2001	8.51	34.03	28.82	683.60	570.39	4.31	567.65	7.61	95.6	13.07	2.34	6.29	5.06
2002	8.45	34.02	29.27	646.16	559.20	3.97	556.52	7.85	94.4 ^b	13.4 ^b	2.02	6.78	4.28
2003	8.60	32.80	27.76	634.39	578.68	3.71	575.07	8.47	93.2	13.77	2.32	6.71	4.86
2004	9.16	29.51	26.06	685.02	611.55	3.03	608.07	8.08	98.5	15.70	2.58	6.82	5.95
2005	9.28	29.41	24.08	628.08	588.75	3.79	584.73	8.44	128.5	22.03	2.96	6.14	5.36
2006	9.80	27.68	22.63	655.90	590.33	2.80	586.72	8.61	109.3	19.04	2.43	7.12	6.83
2007	9.00	25.78	20.94	665.25	593.89	3.76	590.15	8.63	114.7	17.57	2.42	6.40	5.33
2008	8.84	27.72	21.47	634.96	530.55	3.73	525.71	8.65	103.5	11.66	2.14	8.04	6.20
2009	9.30	22.82	19.38	605.24	472.54	4.39	468.35	8.90	114.3	11.34	1.78	7.26	5.94
2010	9.18	22.37	19.36	626.72	503.40	3.71	498.35	9.15	110.0	8.74	2.05	6.83	5.52
2011	8.96	22.62	19.66	569.53	462.87	4.66	457.37	9.37	86.6	9.72	2.05	6.84	6.42
2012	9.25	21.63	16.87	568.42	470.84	5.70	462.95	9.56	99.7	10.13	2.62	6.47	4.24
2013	9.20	19.79	17.09	624.52	597.08	3.83	592.33	9.86	92.5	9.40	2.22	7.71	7.00
2014	8.55	20.52	16.75	619.85	576.48	3.79	571.51	10.14	95.9	10.65	2.02	7.57	5.83
2015	8.53	19.03	15.84	635.13	581.96	4.89	575.48	10.38	100.9	8.78	2.09	8.56	6.94
2016	8.07	19.02	15.82	648.79	732.01	4.66	725.91	10.48	91.5	8.36	1.91	7.40	6.05
2017	8.21	17.75	14.79	667.02	573.17	3.55	568.11	10.31	96.6	12.05	1.99	8.63	6.48
2018	8.57	19.90	14.49	696.21	571.97	3.95	566.38	10.37	79.73	11.6	2.28	6.70	4.56
2019	8.58	16.21	11.93	667.08	548.31	4.27	542.73	10.50	72.92	13.1	2.19	8.20	7.05
2020	8.02	16.92	13.05	672.41	547.19	3.89	541.86	10.30	77.43	13.2	2.60	8.06	7.56
2021	8.10	16.00	12.17	652.56	556.46	5.52	549.26	10.39	84.05	14.1	2.09	6.80	5.10
2022	8.01	16.90	13.45	665.98	572.02	5.05	565.64	10.70	75.15	12.3	2.43	9.83	8.85

b : valeurs interpolées

ANNEXE III

Tableau 4 Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2022, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table 4 Annual total content in metric tons from 1957 to 2022, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Année	Oxygène	Ptot	P-PO ₄ ³⁻	Ntot	Nmin	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Cl	COP	Ppart	Npart
	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
1973	754752	6481	5365	50258	40157	635	39440	258645			
1974	699850	6741	5910	51342	41693	915	40760	276825			
1975	684518	7096	6344	52262	43293	678	42576	292158			
1976	620945	7854	7067	53072	44157	757	43399	307846			
1977	606011	8286	7445	52300	44122	567	43479	330756			
1978	649332	8476	7585	53164	44331	1820	43697	341584			
1979	729640	7613	6826	55731	45438	505	44855	357827			
1980	713880	7737	7095	57044	47666	528	47060	374291			
1981	805457	7039	6089	59163	43581	775	42721	389682			
1982	797560	6621	5931	58009	45417	743	44574	395186			
1983	787909	6486	5750	59592	48247	881	47258	404467			
1984	818624	6498	5739	60803	48620	974	47559	419641			
1985	819979	6286	5600	62542	49195	1164	47985	440308			
1986	845574	6175	5329	61717	48064	582	47413	455880	9495	263	1632
1987	827109	5827	5024	61408	49351	565	48718	463978	6187	252	1197
1988	802149	5316	4691	60965	51061	461	50527	481840	9912	225	1477
1989	743387	5023	4452	61232	51957	495	51398	487935	8016	181	1224
1990	717603	4748	4146	59177	50706	486	50140	498688	8676	211	1382
1991	730179	4495	3895	56747	49846	511	49254	515859	7869	219	1296
1992	724135	4291	3510	59363	49568	467	48997	530155	7839	242	1520
1993	712729	4065	3474	56413	49993	282	49638	531618	7575	199	1146
1994	716736	3849	3392	56750	49881	349	49453	540857	7192	187	1207
1995	706729	3541	3177	57402	49457	300	49058	556198	7585	190	1097
1996	711214	3515	3098	58560	49379	383	48903	574455	9238	199	1920
1997	723582	3240	2897	57897	48875	362	48423	598270	9240	188	1988
1998	709186	3384	2996	56134	47862	732	47330	607035	8867	191	1983
1999	750310	3380	3009	57143	48201	332	47834	619195	7998	196	1139
2000	781665	3140	2736	54103	47985	384	47619	637923	9447	213	1268
2001	732118	2927	2478	58789	49054	371	48818	654269	8219	201	1124
2002	726872	2926	2517	55570	48091	341	47861	675317	8119 ^b	173	1154 ^b
2003	739242	2821	2387	54558	49766	319	49456	728063	8019	199	1184
2004	787556	2538	2241	58912	52594	261	52294	695142	8469	222	1350
2005	798444	2529	2071	54015	50633	326	50287	725507	11054	254	1894
2006	842395	2381	1946	56408	50769	241	50458	740676	9402	209	1637
2007	773780	2217	1801	57211	51074	323	50753	741952	9861	208	1511
2008	760175	2384	1847	54607	45627	321	45211	743509	8897	184	1003
2009	799905	1962	1667	52050	40639	377	40278	765090	9832	153	976
2010	789390	1924	1665	53898	43293	319	42858	787041	9462	176	751
2011	770351	1945	1690	48980	39807	401	39334	805638	7450	177	835
2012	795700	1860	1451	48884	40492	491	39814	822136	8575	225	872
2013	790938	1702	1469	53708	51349	329	50941	847951	7952	191	808
2014	735592	1765	1440	53307	49578	326	49150	871926	8248	174	916
2015	733428	1637	1363	54621	50049	421	49491	893011	8675	180	755
2016	694048	1636	1361	55796	62953	400	62429	900917	7865	165	719
2017	706053	1527	1272	57364	49293	306	48857	886772	8312	171	1036
2018	737418	1712	1246	59874	49189	340	48709	891953	6857	196	995
2019	737713	1394	1026	57369	47154	367	46675	903380	6271	188	1124
2020	689356	1456	1123	57827	47058	335	46600	886212	6659	224	1139
2021	696223	1376	1047	56120	47855	475	47236	893750	7228	180	1211
2022	688645	1454	1157	57274	49194	434	48645	920275	860	209	860

b : valeurs interpolées

ANNEXE IV

Tableau 5 Incertitudes élargies des principales analyses physico-chimiques

Table 5 Expanded uncertainties of main physico-chemical analysis

Paramètre	Unité	Incertitude élargie *
		U (%)
pH		0.4
TAC	meq·L ⁻¹	1.8
χ	S·cm ⁻¹	1.1
NO ₃ ⁻	μgN·L ⁻¹	5.1
NH ₄ ⁺	μgN·L ⁻¹	11.2
Ntot	μgN·L ⁻¹	10.9
NOP	μgN·L ⁻¹	6.0
PO ₄ ³⁻	μgP·L ⁻¹	6.2
Ptot	μgP·L ⁻¹	8.4
Ppart	μgP·L ⁻¹	8.0
COP	μgC·L ⁻¹	3.0
Cl ⁻	mgCl ⁻ ·L ⁻¹	4.4
SiO ₂	mgSiO ₂ ·L ⁻¹	3.9

* Incertitudes calculées avec la validation des méthodes pour des valeurs proches de celles observées sur les échantillons de SHL2 avec un facteur d'élargissement de 2

ANNEXE V

MÉTÉOROLOGIE

1. INTRODUCTION

Le réseau de mesure est constitué des stations climatiques de l'Institut suisse de Météorologie de Genève-Cointrin, Changins, Pully et du laboratoire de l'INRAE de Thonon-les-Bains. Les paramètres climatiques examinés sont : la température de l'air, la pluviométrie, le rayonnement global, le vent et la Rose des vents à Changins.

Rappel : MétéoSuisse, ainsi que MétéoFrance utilisent une période de référence de 30 ans pour classer les événements météorologiques actuels. Le choix de cette période dite de référence est basé sur les spécifications de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). La période de référence la plus récente, 1991-2020, est utilisée à partir de janvier 2022.

2. TEMPÉRATURE DE L'AIR

En 2022, à part trois mois avec des températures conformes à leurs normales (janvier, avril, septembre); le reste de l'année, les températures moyennes mensuelles sont toutes supérieures à leurs normales (tableau 1.1, figure 1.1). Les mois de mai à août et octobre furent particulièrement chauds (moyenne inter-stations de +2.3 à +3.3 °C de plus que la normale)

Tableau 1.1: Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2022 (°C).

Table 1.1: Mean monthly air temperature for each station in 2022 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1991 - 2020
Janvier	2	2.1	2.8	3.2	2.6
Février	5.1	5.1	5.4	5.6	3.2
Mars	7.4	7.7	8.1	7.8	6.9
Avril	10.3	10.3	10.4	10.4	10.5
Mai	17.6	17.4	17.7	17.7	14.6
Juin	21.2	20.8	21.1	21.4	18.4
Juillet	23.6	23.5	23.4	23.2	20.6
Août	22.3	22.5	22.6	22.4	20.2
Septembre	15.9	15.7	16.3	16.6	16.0
Octobre	14.7	14.4	15.2	15.2	11.6
Novembre	8.2	8.2	9.1	9.2	6.5
Décembre	5.1	4.7	5.1	5.6	3.3
Moyenne	12.8	12.7	13.1	13.2	11.2

En 2022, la température moyenne annuelle inter-stations est de 12.9°C avec 0.6°C de plus que les années les plus chaudes (2018-2022). L'année 2022 se classe donc au 1er rang (sur 32) de la chronologie 1991 - 2022 (la dernière étant 1996 avec 10.2 °C) (tableau 1.2, figure 1.2).

Tableau 1.2. Température moyenne annuelle de l'air de l'inter-stations (°C).

Table 1.2. Mean annual air temperature at the inter-stations (°C).

Années	Température moyenne annuelle	Années	Température moyenne annuelle
1991	10.4	2007	11.4
1992	10.9	2008	10.9
1993	10.4	2009	11.3
1994	11.9	2010	10.3
1995	10.9	2011	11.8
1996	10.2	2012	11.1
1997	11.1	2013	10.3
1998	11.0	2014	11.7
1999	11.0	2015	11.7
2000	11.6	2016	11.2
2001	11.0	2017	11.5
2002	11.5	2018	12.3
2003	11.7	2019	11.8
2004	11.0	2020	12.3
2005	10.6	2021	11.0
2006	11.3	2022	12.9

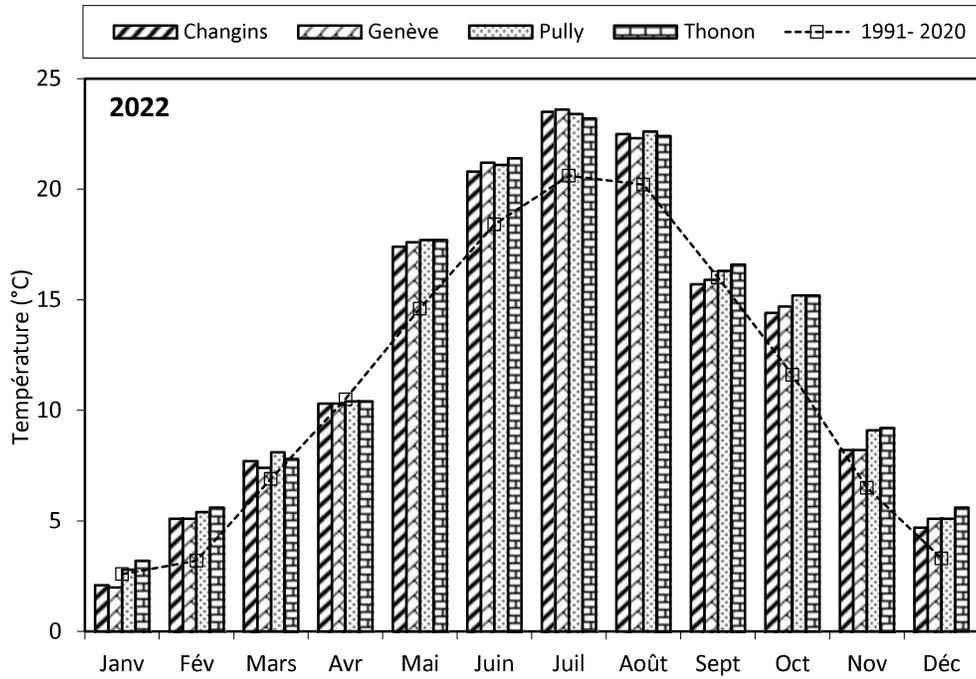


Figure 1.1. Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2022 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 1.1. Mean monthly air temperature at each station in 2022 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

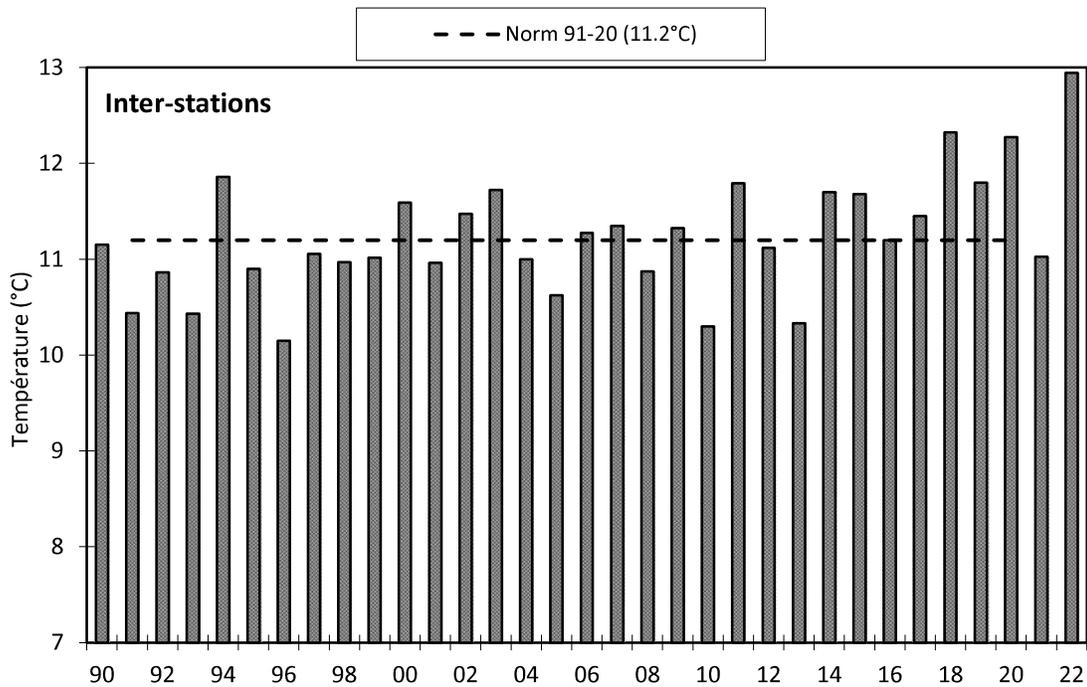


Figure 1.2. Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

Figure 1.2. Mean annual air temperature for the inter-stations (°C).

3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2022 sur le bassin lémanique est de 824 mm, soit 183 mm inférieur à la normale inter-stations (1'006.2 mm) relevée sur les 4 stations entre 1991 et 2020. Pully est la station la plus arrosée avec 925 mm, Genève avec 694 mm a les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

Après huit mois très déficitaires (-295 mm par rapport à la période janvier – août de la normale de l'inter-station), les quatre derniers mois permirent d'atténuer le déficit global.

Tableau 2.1. Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2021.

Table 2.1. Monthly rainfall (mm) at each station in 2021.

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Inter-stations 1991 - 2020
Janvier	27.5	33.2	37.2	36.5	72.7
Février	48.9	56.3	64.3	34.5	58.5
Mars	18.4	16	13.3	25.5	64.4
Avril	54	68.5	78.1	32.0	73.0
Mai	12	10.4	26.4	22.5	92.6
Juin	63.9	75	98.3	96.5	91.0
Juillet	5	12.4	25.6	43.0	88.3
Août	48	44.1	38.6	81.5	91.5
Septembre	120.1	159.7	183.5	165.0	90.1
Octobre	76.8	97.3	109.1	107.0	100.2
Novembre	106.5	105.7	114.7	116.5	91.8
Décembre	112.7	121.6	136.2	114.5	92.1
Total annuel	693.8	800.2	925.3	875.0	1'006.2

En inter-stations, l'année 2022 se classe au 27^e rang (sur 32) de la chronologie pluviométrique 1991 - 2022 (la 1^{ère} étant 2001 avec 1'299 mm, la dernière étant 2011 avec 750 mm) (tableau 2.2, figure 2.2).

Tableau 2.2. Pluviométrie annuelle de l'inter-stations (mm).

Table 2.2. Annual rainfall at the inter-stations (mm).

Années	Pluviométrie total annuel	Années	Pluviométrie total annuel
1991	860.3	2007	1'135.7
1992	1'057.8	2008	1'047.8
1993	1'060.5	2009	849.9
1994	1'124.1	2010	815.5
1995	1'194.7	2011	750.1
1996	972.8	2012	1'092.3
1997	1'022.9	2013	1'219.0
1998	924.6	2014	1'068.1
1999	1'266.0	2015	808.7
2000	1'028.2	2016	1'115.0
2001	1'298.7	2017	833.7
2002	1'169.5	2018	916.9
2003	760.6	2019	1'004.1
2004	980.0	2020	971.1
2005	775.1	2021	1'104.3
2006	1'069.2	2022	823.6

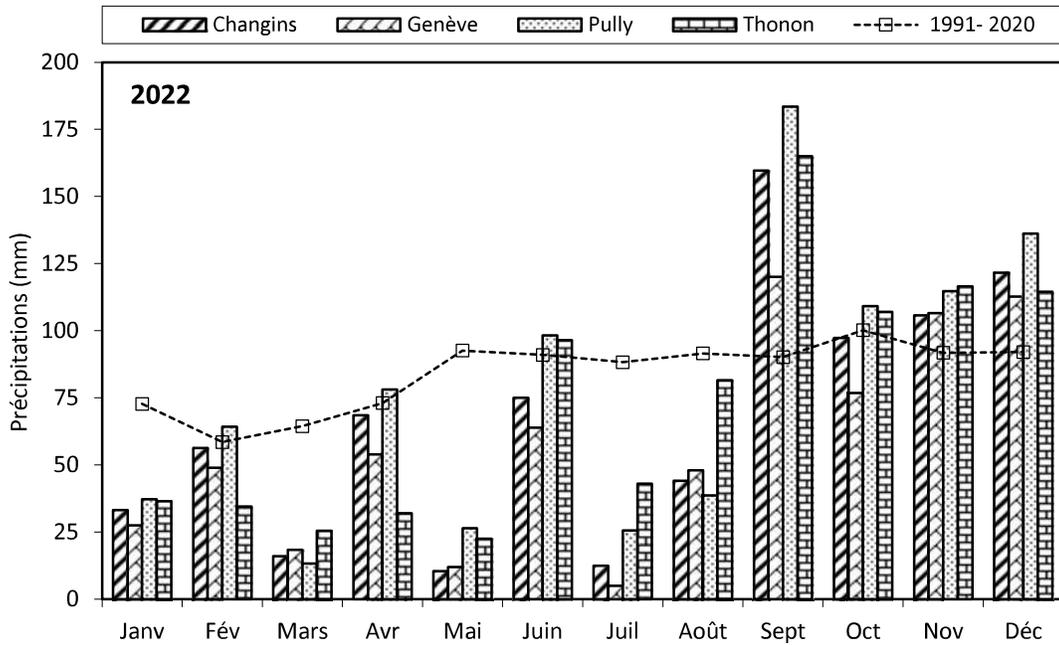


Figure 2.1. Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2022 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 2.1. Monthly rainfall at each station in 2022 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

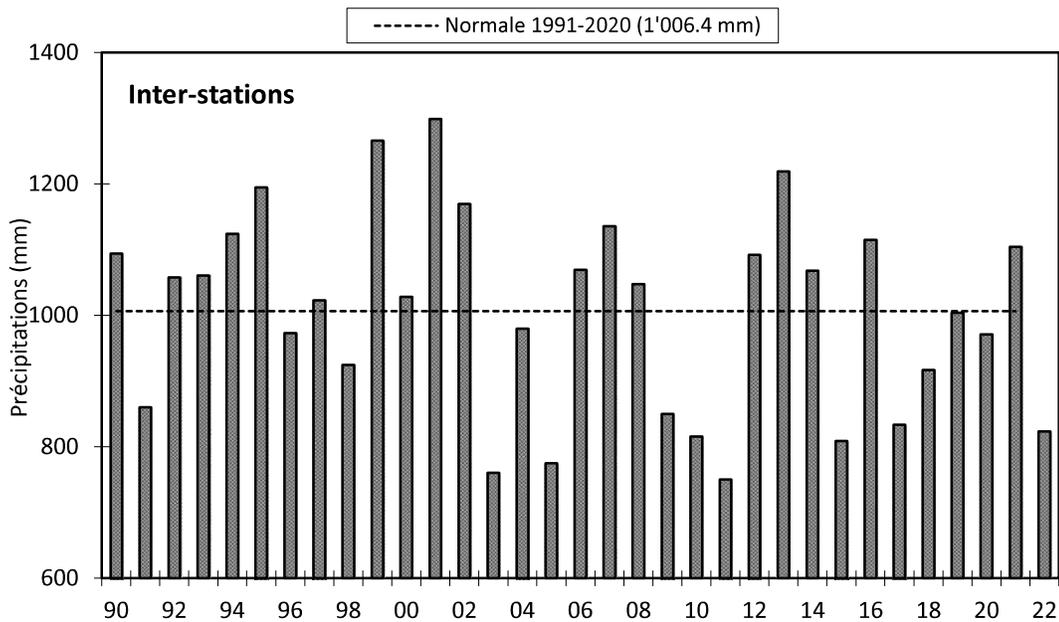


Figure 2.2. Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

Figure 2.2. Annual rainfall at the inter-stations (mm).

4. INSOLATION

À part les mois de septembre, novembre et décembre où l'insolation mesurée fut conforme à la normale, le reste de l'année fut très excédentaire (tableau 3.1, figure 3.1). Par rapport à la normale inter-stations l'excédent est sur l'année de 410.6 heures soit l'équivalent de la somme des 4 derniers mois de l'inter-stations normale (430.6h).

Tableau 3.1. Insolation mensuelle à chaque station en 2022 (h).

Table 3.1. Monthly insolation at each station in 2022 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1991 - 2020
Janvier	108	132.3	132.1	82	66.4
Février	150.3	156.6	143.4	149	102.4
Mars	207.7	223.9	223.2	223	168.5
Avril	216.9	224.5	208.9	228	195.4
Mai	285.8	279.6	291.3	314	220.0
Juin	268.7	263.7	261.3	294	250.2
Juillet	374.5	366.7	347	370	269.4
Août	285.4	287.3	278.5	276	243.9
Septembre	179	185.6	173.9	195	189.4
Octobre	155.5	152.9	160.5	157	124.1
Novembre	71.1	76.1	75	67	70.2
Décembre	39.8	41.7	34.8	27	51.0
Total annuel	2'342.7	2'390.9	2'329.9	2'382.4	1'950.9

L'année 2022 avec une moyenne inter-stations de 2'361.5 heures est une année très ensoleillée. Avec ces 2'292h d'ensoleillements, elle se classe première sur la période 1981 - 2022 avec plus de 71 heures par rapport à la 2^e (2003) avec 2'290 h, (la dernière étant 1993 avec 1'669.2h), cf tableau 3.2 et figure 3.3.

Tableau 3.2. Insolation annuelle de l'inter-stations (h).

Table 3.2. Annual insolation at the inter-stations (h).

Années	Insolation total annuel	Années	Insolation total annuel
1991	1'870.0	2007	2'096.7
1992	1'676.1	2008	1'961.9
1993	1'669.2	2009	2'028.4
1994	1'707.5	2010	1'817.3
1995	1'896.5	2011	2'203.0
1996	1'769.3	2012	2'008.4
1997	1'948.4	2013	1'813.2
1998	1'981.7	2014	1'902.8
1999	1'770.1	2015	2'043.9
2000	1'998.9	2016	1'847.7
2001	1'837.6	2017	2'089.5
2002	1'828.6	2018	2'042.3
2003	2'290.5	2019	2'152.8
2004	2'000.1	2020	2'150.6
2005	2'138.4	2021	1'994.3
2006	1'992.4	2022	2'361.5

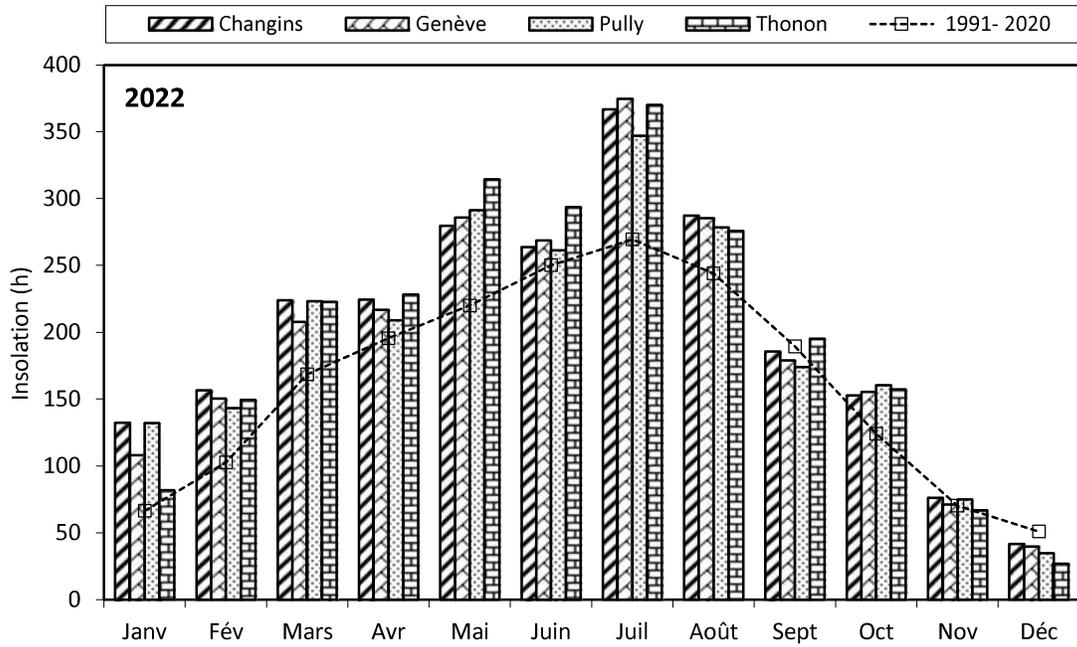


Figure 3.1. Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2022 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 3.1. Monthly insolation at each station in 2022 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

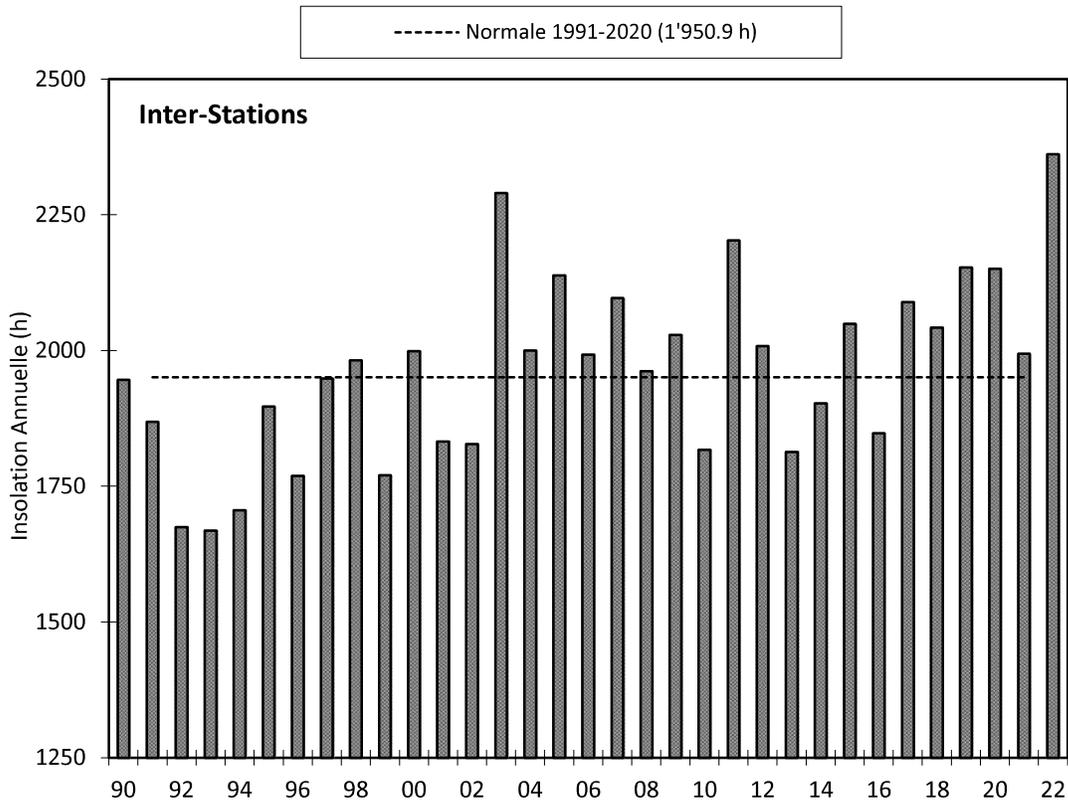


Figure 3.2. Insolation annuelle de l'inter-stations.

Figure 3.2. Annual insolation at the inter-stations.

5. RAYONNEMENT

La moyenne inter-stations du rayonnement pour l'année 2022 est de 14.4 MJ·m⁻²·d⁻¹ (tableau 4.1, figure 4.1).

Tableau 4.1. Rayonnement global mensuel à chaque station en 2022 (moyenne journalière en MJ·m⁻²·d⁻¹).

Table 4.1. Global monthly solar irradiation at each station in 2022 (mean daily irradiation in MJ·m⁻²·d⁻¹).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Inter-stations 1991 - 2020
Janvier	5.1	5.5	5.7	4.2	3.8
Février	9.2	9.1	8.8	8.6	7.0
Mars	14.1	14.2	15.1	13.8	11.9
Avril	18.2	17.8	17.5	17.6	16.5
Mai	23.5	23.3	23.6	23.8	19.6
Juin	23.9	23.8	23.2	23.9	22.2
Juillet	27.1	27.2	26.2	27.0	21.9
Août	21.2	21.0	20.6	20.4	18.7
Septembre	15.0	14.5	14.2	14.2	13.9
Octobre	9.6	9.3	9.5	9.2	8.2
Novembre	4.7	4.9	5.1	4.2	4.4
Décembre	2.6	2.8	2.9	2.1	3.0
Moyenne annuelle	14.5	14.5	14.4	14.1	12.6

Pour l'inter-stations en 2022, le rayonnement global annuel obtenu est de 5'243. MJ·m⁻², ce qui classe l'année, première sur la période 1991 – 2022 (tableau 4.2, figure 4.2).

Tableau 4.2. Rayonnement global annuel en inter-stations (MJ·m⁻²).

Table 4.2. Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ·m⁻²).

Années	Rayonnement global total annuel	Années	Rayonnement global total annuel
1991	4'415	2007	4'671
1992	4'219	2008	4'486
1993	4'126	2009	4'837
1994	4'100	2010	4'575
1995	4'339	2011	5'000
1996	4'310	2012	4'747
1997	4'405	2013	4'547
1998	4'378	2014	4'653
1999	4'188	2015	4'869
2000	4'488	2016	4'584
2001	4'310	2017	4'923
2002	4'337	2018	4'922
2003	4'894	2019	4'981
2004	4'858	2020	4'995
2005	4'712	2021	4'840
2006	4'593	2022	5'243

Figure 4.1. Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2022 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 4.1. Mean monthly global solar irradiation at each station in 2022 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

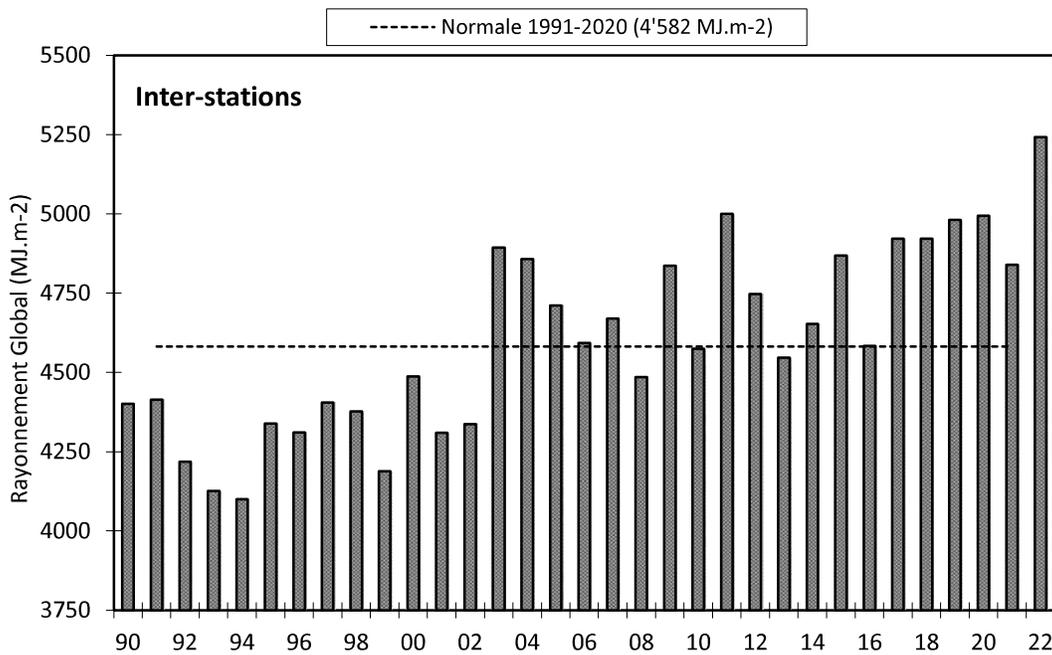
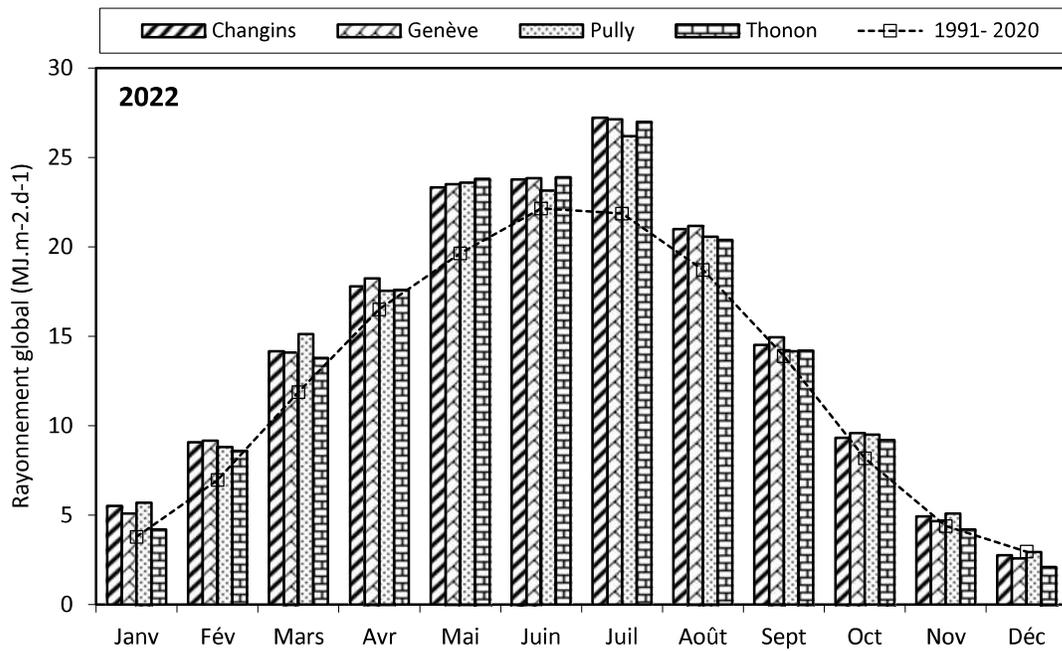


Figure 4.2. Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m⁻²).

Figure 4.2. Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ.m⁻²).

6. VENT

6.1. VITESSE DU VENT

En 2022 à Changins, station de référence, au mois de mars la moyenne est inférieure de 1 m/s à la normale du mois, le troisième trimestre fut lui venteux, et le quatrième trimestre de l'année les moyennes mensuelles furent inférieures à leurs normales (particulièrement au mois d'octobre : 0.7 m/s de moins, tableau 5.1, figure 5.1 et tableau 5.2).

Tableau 5.1. Moyenne mensuelle de la vitesse du vent en 2021 m/s

Table 5.1. Mean monthly wind speeds in 2021 m/s

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1991-2020
Janvier	2.8	3	1.8	1.7	2.5
Février	2.7	3	1.9	1.4	2.8
Mars	1.9	2.1	1.7	0.9	3.1
Avril	2.9	3.1	2	1.5	3.0
Mai	2.7	2.8	1.9	1.2	2.8
Juin	2.4	2.4	1.7	1.2	2.6
Juillet	2.7	2.9	2	1.5	2.6
Août	2.3	2.6	1.8	1.2	2.6
Septembre	2.4	2.5	1.9	1.4	2.4
Octobre	1.6	1.6	1.4	0.8	2.3
Novembre	1.9	2	1.6	1.0	2.3
Décembre	2.2	2.2	1.5	1.6	2.5
Moyenne annuelle	2.4	2.4	1.8	1.3	2.6

Pour l'année 2022 à Changins, il a été enregistré 19 jours de vent fort (> 5 m/s) dont 15 jours durant le 1^{er} semestre. Le maximum de vent moyen journalier a été relevé le 18 mars pour l'année 2022 avec une vitesse de 8.9 m/s (figure 5.2).

Tableau 5.2. Vent moyen annuel à Changins m/s

Table 5.2. Mean annual wind speed at Changins m/s

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1991	3.2	2007	2.7
1992	2.8	2008	2.5
1993	2.9	2009	2.6
1994	2.7	2010	2.6
1995	2.9	2011	2.2
1996	2.7	2012	2.6
1997	2.5	2013	2.4
1998	3.0	2014	2.3
1999	2.9	2015	2.5
2000	2.6	2016	2.4
2001	2.8	2017	2.4
2002	2.6	2018	2.6
2003	2.3	2019	2.1
2004	2.4	2020	2.6
2005	2.2	2021	2.7
2006	2.4	2022	2.5

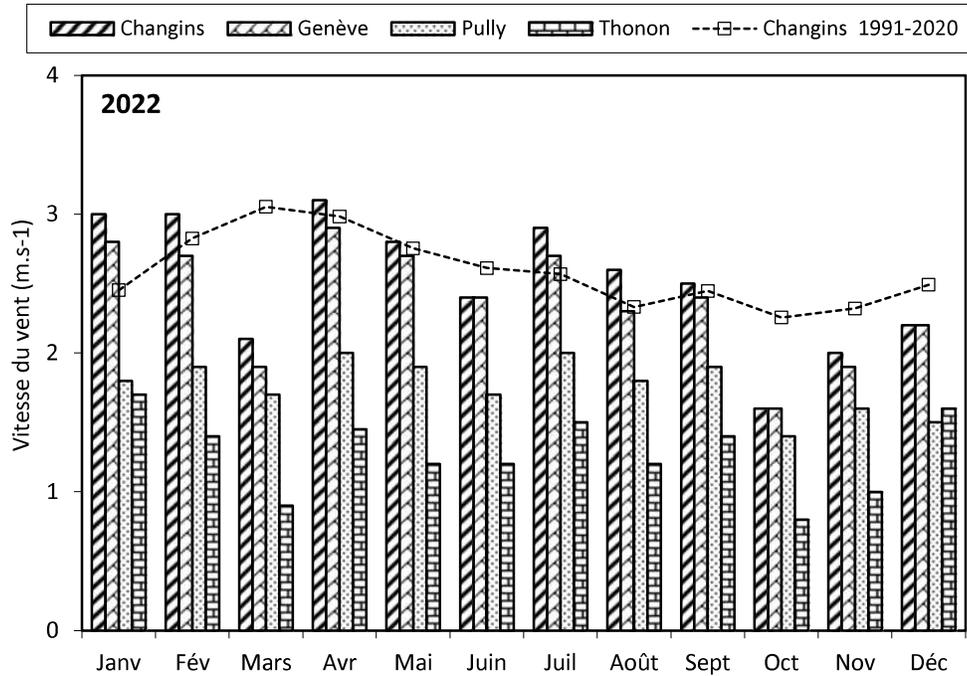


Figure 5.1. Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2022 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 5.1. Mean monthly wind speeds at each station in 2022 (histogram), and at Changins for the period 1991 - 2020 (curve).

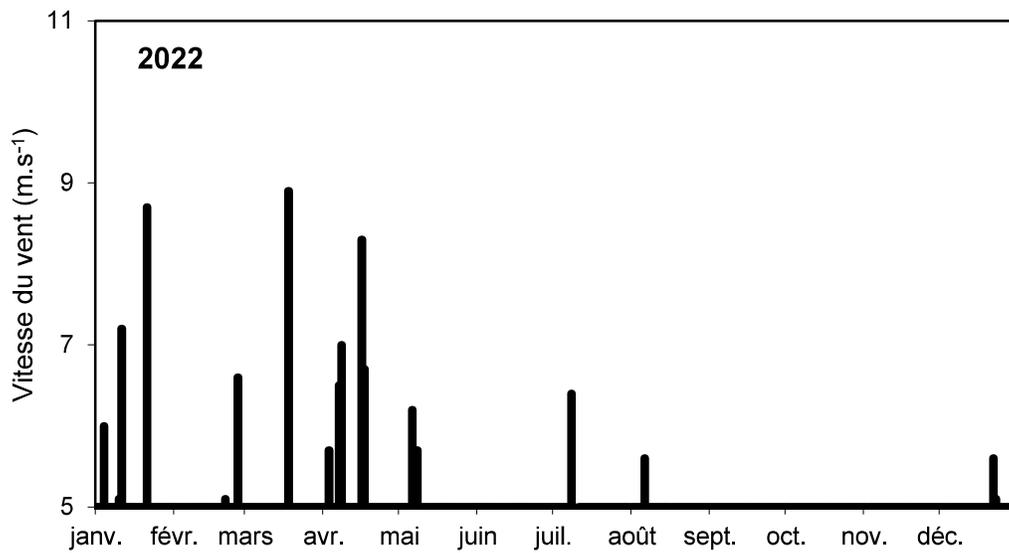


Figure 5.2. Répartition annuelle (en 2022) des vents forts (> 5m/s) à Changins.

Figure 5.2. Annual distribution (in 2022) of strong winds (> 5 m/s) at Changins.

6.2. ROSE DES VENTS

Pour l'année 2022 à Changins, 60.7 % des vents (figure 5.3) se répartissent selon le demi-cercle S-O-N. 69 % des vents enregistrés ont une vitesse entre 0 et 3 m/s. Les vents qui sont supérieurs à 5 m/s représentent 13.8 % des vents totaux, 54.8 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; et 36.8 % sont d'origine opposée S-O.

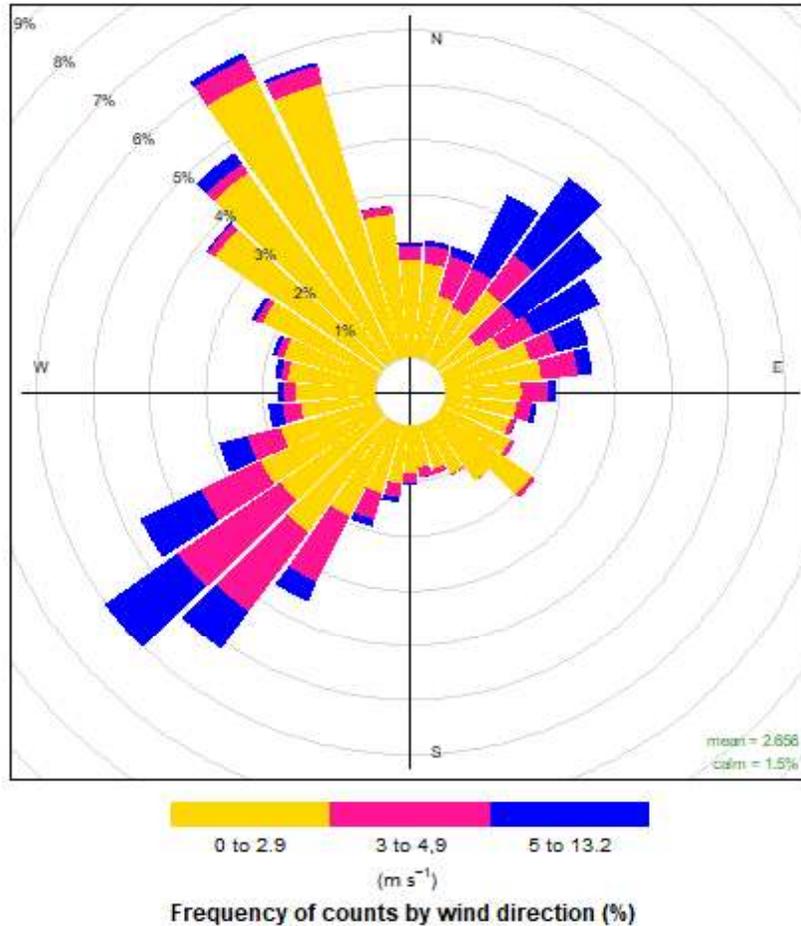


Figure 5.3. Rose des vents à Changins en 2022 (pourcentage d'occurrence des vents horaires par direction et par classe de force).

Figure 5.3. Wind rose at Changins in 2022 (frequency of hourly wind direction occurrence by strength).