

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

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

CAMPAGNE 2021

Viet TRAN KHAC, Philippe QUETIN et Orlane ANNEVILLE

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

RESUME

L'année 2021 est caractérisée par un hiver doux (+2.5 pour le mois de février) et par un printemps plus frais (-2.4 °C pour les mois d'avril et mai) que la normale 1991-2020. A partir du mois d'avril, l'insolation moyenne est de 250 heures, soit 30% de plus que la normale. La pluviométrie du mois de juillet est excédentaire 2.3 fois supérieure à la normale de ce mois.

Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 6.0°C soit une augmentation continue de 1.1°C depuis le dernier brassage complet en 2012.

En 2021, la profondeur du brassage hivernal partiel est observée à 145 m au mois de mars. La tendance de diminution de la profondeur du brassage hivernal en lien avec le réchauffement climatique est à confirmer dans les prochaines années.

Ce brassage partiel n'est pas suffisant pour réoxygéner l'eau de la couche d'eau 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⁻¹ pour toute l'année. La valeur minimale est de 1.4 mgO₂·L⁻¹, soit la concentration la plus faible depuis 2012.

En 2021, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total est de 16.0 µgP/L. La concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphates est de 12.2 µgP/L.

La concentration des ions chlorures dans le Léman se stabilise autour d'une concentration moyenne annuelle de 10.4 mg/L.

ABSTRACT

2021 was characterized by a mild winter (+2.5°C in February) and a cool spring (-2.4°C in April and May) compared to the 1991-2020 climate normal. Starting from April, the average monthly insolation was 250 hours (30% more than the climate normal). The rainfall was 2.3 times higher than normal in July.

The lowest temperature recorded at the bottom of the lake during winter was 6.0°C. The winter mixing reached 145m in March 2021. The relationship between the decreasing trend of winter mixing depth and global warming is to be confirmed in the coming years.

Deep water layers were not reoxygenated. The dissolved oxygen concentration at the bottom of the lake was 2.3 mgO₂/L during the winter mixing and remained lower than 3 mgO₂/L for the whole year. The minimum value was 1.4 mgO₂/L. It is the lowest observed concentration since 2012.

In 2021, the annual average concentrations of total phosphorus and orthophosphate were respectively 16.0 µgP/L and 12.2 µgP/L.

The chloride concentration has been plateauing since 2015 with values around 10.4 mg/L in 2021.

1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman réalisé dans le Grand Lac à la station SHL2 en 2021, et présente l'évolution de 17 paramètres (température, pH, conductivité, titre alcalimétrique complet, oxygène dissous, phosphore total, orthophosphates, phosphore total particulaire, azote total, azote ammoniacal, nitrate, azote organique particulaire, chlorure, carbone organique particulaire, silice, chlorophylle-a et transparence).

L'ensemble des conditions météorologiques de l'année 2021 (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.

Le présent rapport utilise les données du suivi environnemental du Léman fournies par l'Observatoire OLA (Observatoire des Lacs Alpins) pour la période 1973-2021 (SOERE OLA-IS 2021).

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)

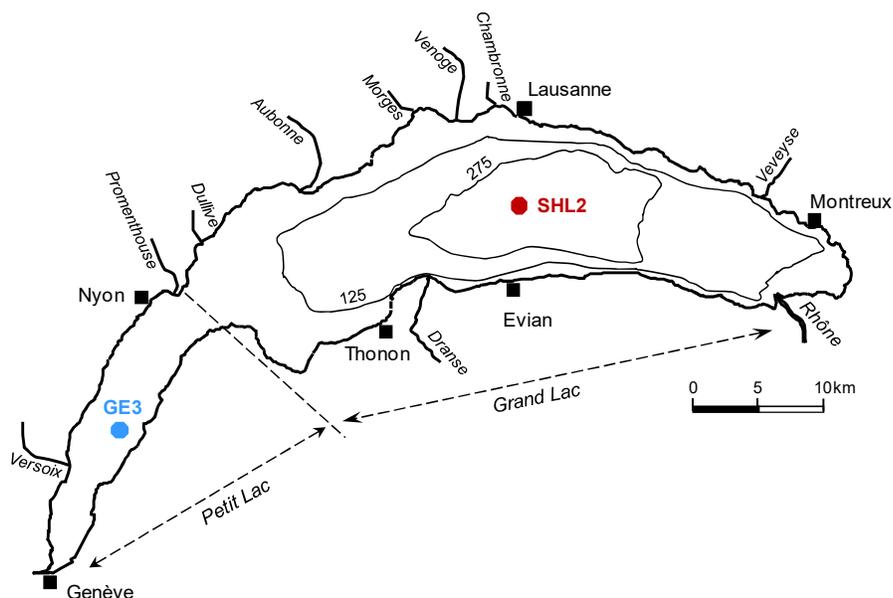


Figure 1 : Situation des points de prélèvement pour le suivi de la CIPEL sur le Léman

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

La station SHL2 est admise comme représentative de l'évolution à long terme du Grand Lac au point de vue physico-chimique (BLANC et *al.*, 1993). 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).

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.

La fréquence d'échantillonnage est adaptée au cycle biologique du lac : lorsque l'activité biologique et la composition chimique du lac évolue 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 2021, 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	2021-01-26	11	2021-07-21
2	2021-02-16	12	2021-08-09
3	2021-03-02	13	2021-09-02
4	2021-03-16	14	2021-09-15
5	2021-04-20	15	2021-09-27
6	2021-05-03	16	2021-10-19
7	2021-05-19	17	2021-11-16
8	2021-06-01	18	2021-12-06
9	2021-06-14		
10	2021-07-07		

Les prélèvements sont effectués selon des techniques uniformisées par l'UMR CARTELE INRAE de Thonon-les-Bains (Unité Mixte de Recherche entre l'INRAE et l'Université de Savoie Mont Blanc ; Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et les Écosystèmes Limniques), qui procède également à diverses mesures « *in-situ* ». 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 le laboratoire de chimie de l'UMR CARTELE INRAE de 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 du vent et vitesse du vent) et la transparence de l'eau sont notées au moment de prélèvements. Les profils verticaux avec une résolution de 0.1m de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH et chlorophylle *a in vivo* sont également réalisés à l'aide d'une sonde multi-paramètres immergeable.

3. METEO

3.1. TEMPÉRATURE DE L'EAU

En 2021, la strate des 10 premiers mètres est moins chaude qu'en 2020, année la plus chaude enregistrée en France, excepté pour le mois d'octobre 2021. La température moyenne estivale en 2021 est de 17.5°C, soit 2.4°C de moins que celle en 2020 (Figure 2).

Les mois hivernaux de l'année 2021 sont doux et les mois printaniers et estivaux sont moins chauds que ceux de 2020. La température de la couche de surface est supérieure au 75^e percentile des températures mesurées sur la période 1973-2020 pour les mois hivernaux, de septembre et de décembre. Elle est proche du 1^{er} quartile pour les mois de mai à août (Figure 3).

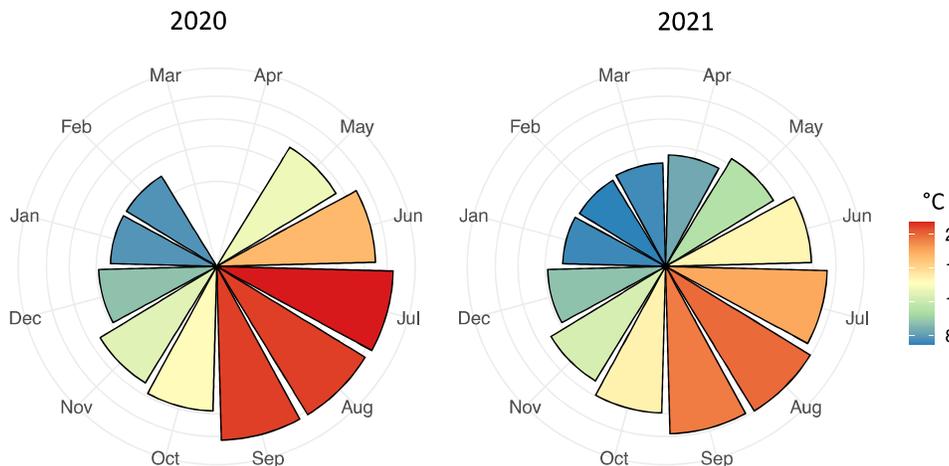


Figure 2 : Température 25oyenne mensuelle dans la couche (0-10 m) en 2020 et 2021, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 2 : Monthly average temperature in water layer (0-10 m) in 2020 and 2021, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

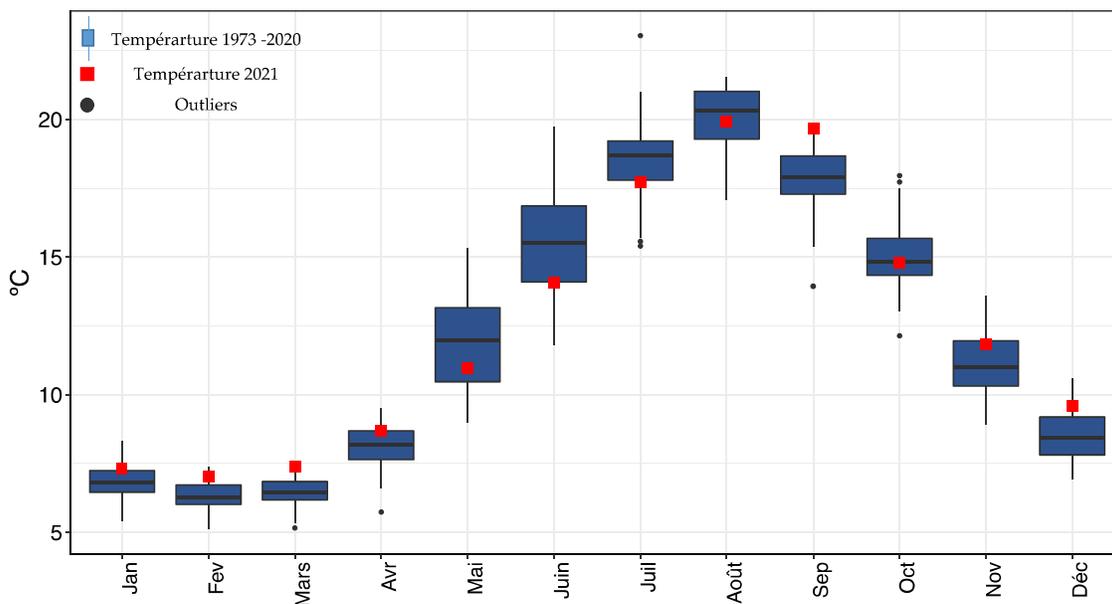


Figure 3 : Température 25oyenne mensuelle de l'eau de la couche (0-10m) du 1973-2020 (boxplot) et en 2021 (carré rouge) – Léman – Grand Lac (SHL2).

Figure 3 : Monthly average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 – 2019 (boxplot) and in 2021 (red square), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2).

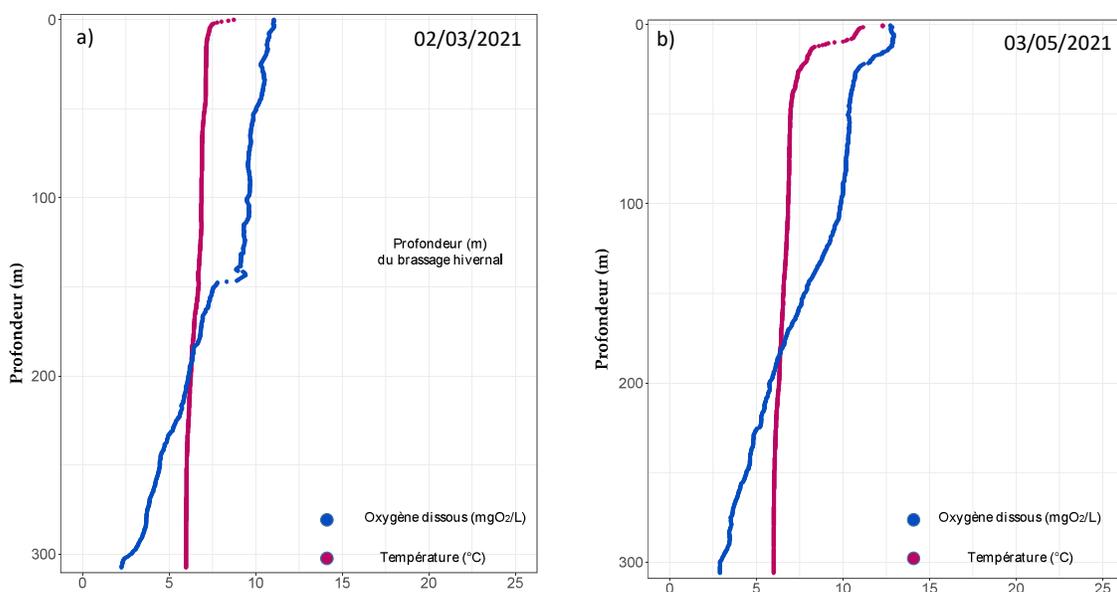
En 2021, la profondeur du brassage hivernal partiel est observée à 145 m à la date du 02 mars 2021 (Figure 4a). Ce brassage partiel n'est pas suffisant pour réoxygéner les couches d'eau profonde du lac. La concentration en oxygène dissous mesurée au fond du lac est de 2.2 mgO₂/L, soit une diminution de 1.1 mgO₂/L par rapport au même moment de l'année 2020 (Figure 4a).

Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 6.0°C le 26 janvier 2021 soit une augmentation continue de 1.1°C depuis le dernier brassage complet en 2012. Depuis l'année 2017, les profondeurs du brassage sont respectivement 190m en 2017, 201m en 2018, 135m en 2019, 120m en 2020 et 145m en 2021. Le lien entre le réchauffement climatique et la diminution progressive de la profondeur du brassage est à confirmer dans les prochaines années.

A partir du mois d'avril en 2021, 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 2021 (Figure 4b, Figure 5).

D'après les mesures *in-situ* de la sonde multi-paramètre, la concentration en chlorophylle-a est de 10.3 µgChl a/L à 19.1 m au 03 mai 2021, associée à une concentration en oxygène dissous de 11.7 mgO₂/L soit 104 % en saturation d'oxygène. Ces pics d'oxygène dissous correspondent à une activité phytoplanctonique importante durant la phase printanière (mai 2021) et en fin d'été (août 2021) (Rimet, ce rapport).

La stratification estivale maximale est observée le 09 août 2021 avec une température moyenne de 19.9°C sur 0-10 m (Figure 4c, Figure 5). L'enfoncement de la thermocline de la masse d'eau est observé le 16 novembre 2021 (Figure 4d, Figure 5).



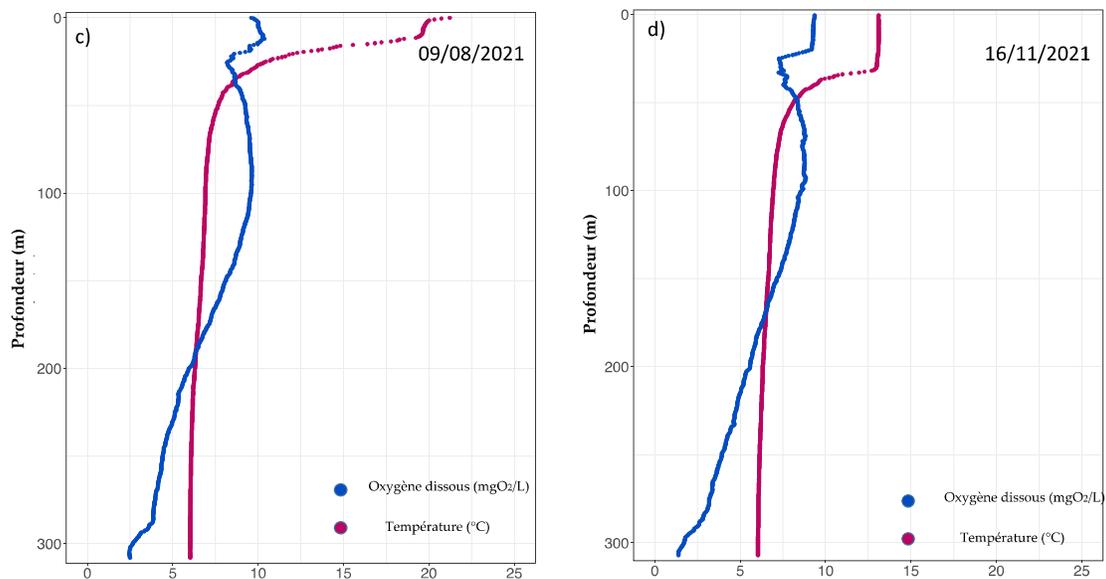


Figure 4 : Profil physico-chimique réalisé à l'aide de sondes multi-paramètres, Léman – Grand Lac (SHL2) :

- a) en hiver lors du brassage partiel maximal observable (02.03.2021),
- b) au printemps (03.05.2021),
- c) en été (09.08.2021),
- d) en automne (16.11.2021).

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

- a) in winter after maximal observable water mixing (02.03.2021),
- b) in spring (03.05.2021),
- c) in summer (09.08.2021),
- d) in autumn (16.11.2021).

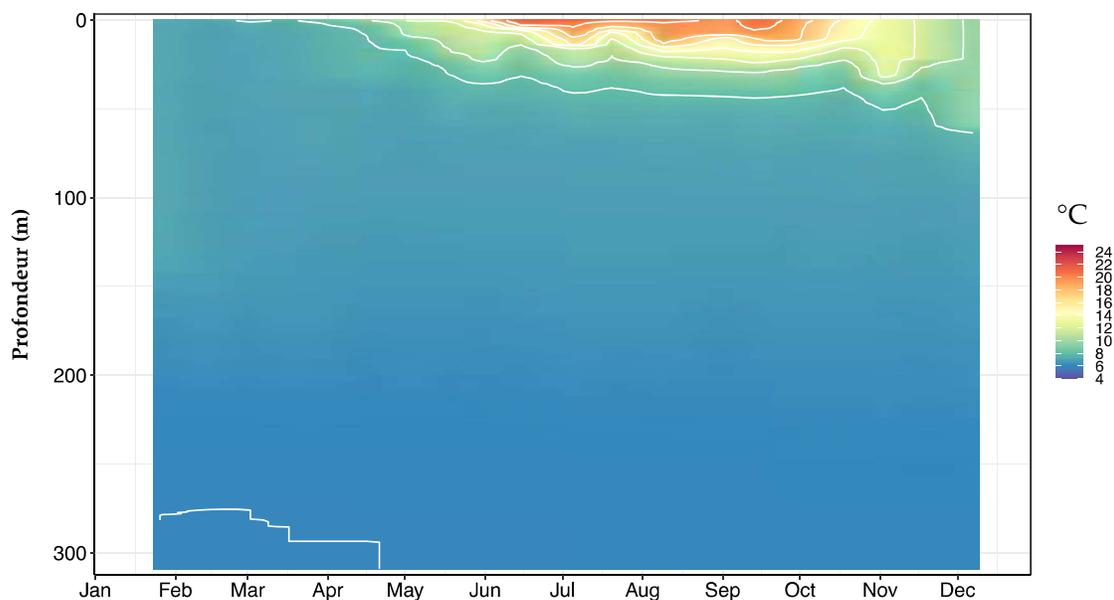


Figure 5 : Température des eaux du lac en 2021 (iso-contour en blanc), Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 5 : Water temperature in the lake in 2021 (iso-contour lines in white), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

3.2. VARIATION INTERANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU

La variation interannuelle de la température de différentes couches d'eau est présentée dans la figure 6. Les couches d'eau à 50 m et 100 m représentent une variabilité interannuelle plus marquée que les couches profondes de 200 m et 309 m.

Dans la couche d'eau profonde, la température de l'eau est passée de 5.1 °C en 2012 à 6.0 °C en 2021, soit une augmentation de 0.9°C en 9 ans. L'absence de brassage hivernal complet explique l'augmentation de la température observée ces dernières années (Figure 6).

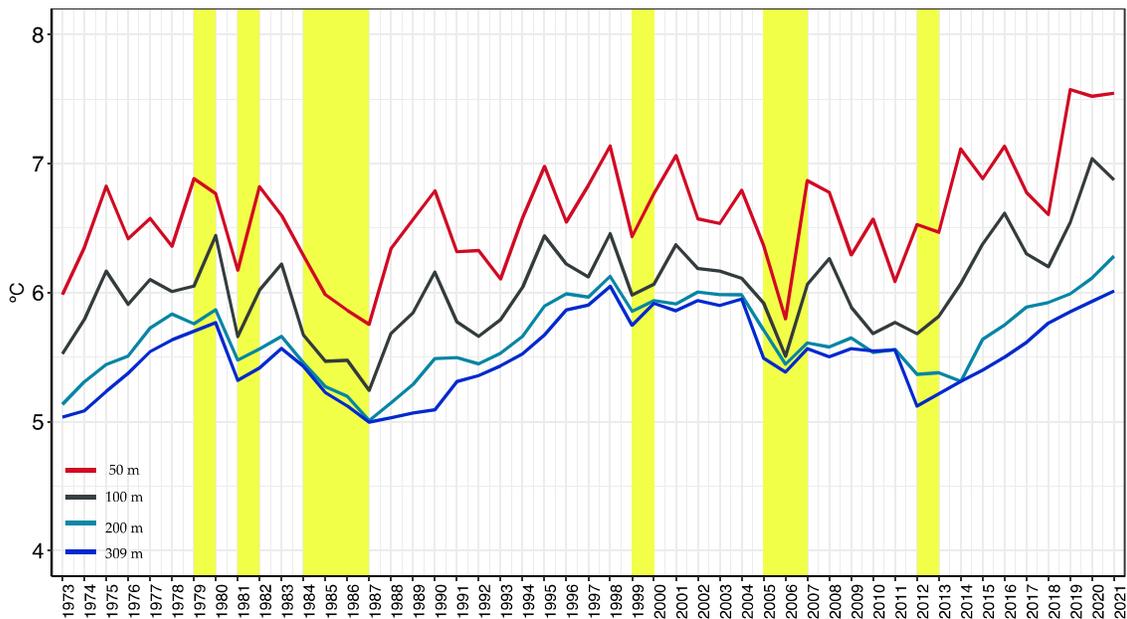


Figure 6 : Évolution de la température annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1973 à 2021, Léman – Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 6 : Inter-annual changes in annual mean water temperature in the lake at depths of 50, 100, 200 and 309 meters from 1973 to 2021, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete winter mixing.

La température moyenne annuelle dans la couche 0-10 m montre une tendance au réchauffement statistiquement significative depuis 1973 (p-value < 0.005) (Figure 7). En 2021, la température de cette couche est de 12.4°C, soit une diminution de 1.5°C par rapport à l'année la plus chaude enregistrée en France.

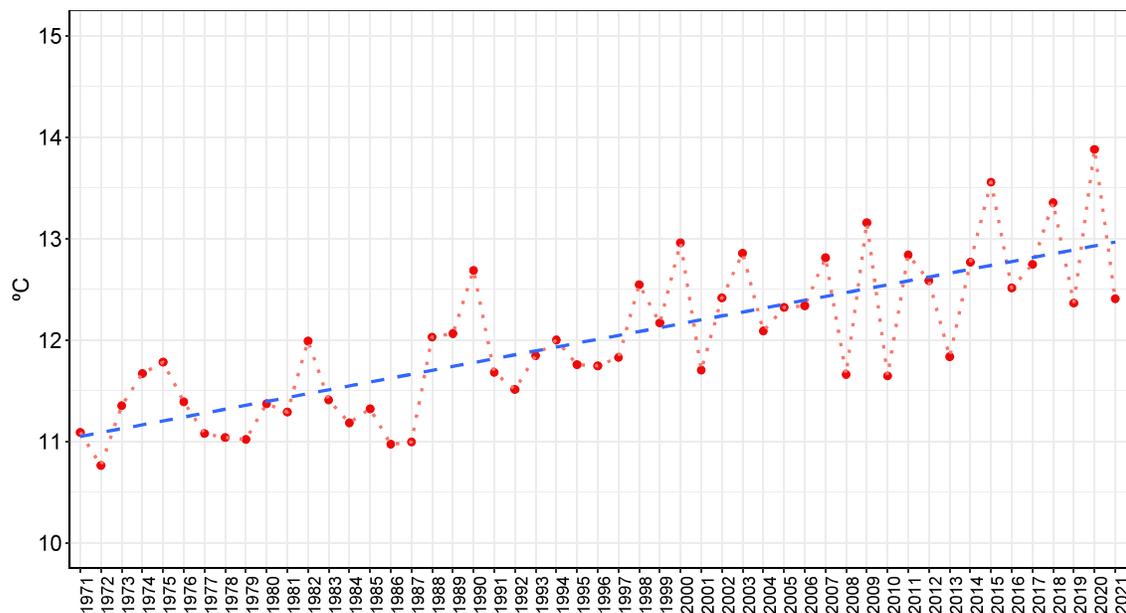


Figure 7 : Évolution de la température annuelle de l'eau de la couche 0-10m de 1973 à 2021, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 7 : Inter-annual changes in the annual average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 to 2021, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

4. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES ASSOCIÉ À L'ACTIVITE PHYTOPLANCTONIQUE

4.1. TRANSPARENCE DE L'EAU

La dynamique de transparence pour l'année 2021 est représentée sur la figure 8. La transparence était maximale jusqu'à 11.8m le 26 janvier 2021. Par la suite, la reprise de l'activité photosynthétique, induit l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique et provoque une diminution progressive de la transparence jusqu'à une valeur de 2.8 m le 01 juin 2021.

Après cette date, la transparence augmente à 7.7m en raison de la baisse de l'abondance de la communauté phytoplanctonique alors fortement broutée par le zooplancton. En juillet, la transparence diminue exceptionnellement à 3.0m suite à une pluviométrie importante soit de 200mm en moyen pour les 4 stations. La transparence est de 7.5m le 09 août et diminue fortement à 4.2m et 3.7m en septembre 2021. Cette diminution pourrait avoir un lien avec le bloom d'*Uroglena* observé à cette période. Enfin, sur la dernière partie de l'année, la transparence augmente progressivement et atteint 10.5m le 06 décembre 2021 (Figure 8).

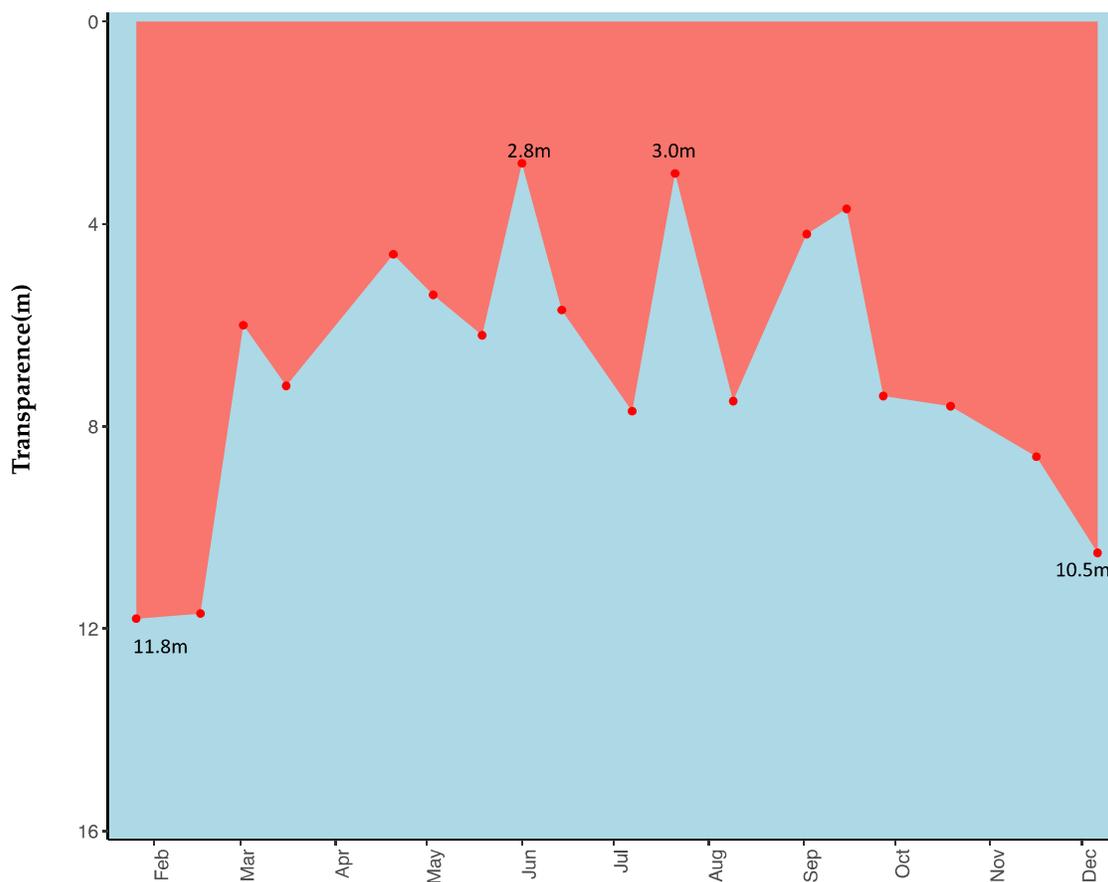


Figure 8 : Transparence avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 8 : Transparency using a Secchi disk, Léman - Grand Lac (SHL2)

4.2. PH

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

La figure 9 représente l'évolution saisonnière du pH dans la colonne d'eau du lac. A l'issue du brassage hivernal qui s'est étendu jusqu'à 145 m, le pH de la colonne d'eau oscille entre 7.5 et 8.2 tel que l'on peut l'observer sur le profil du 02 mars 2021 (Figure 9).

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. Lors du pic de la chlorophylle-a du 03 mai 2021, le pH maximal est de 8.6 à 6m de profondeur, soit 0.5 unité supérieure à la valeur du pH à l'issue du brassage hivernal 2021. Durant l'été, le pH reste élevé dans les dix premiers mètres et varie entre 8.3 et 8.7. Le pH diminue progressivement par la suite et le pic du pH s'enfonce à 38m le 07 décembre 2021 en raison de la déstratification de la masse d'eau et de la diminution de l'activité phytoplanctonique.

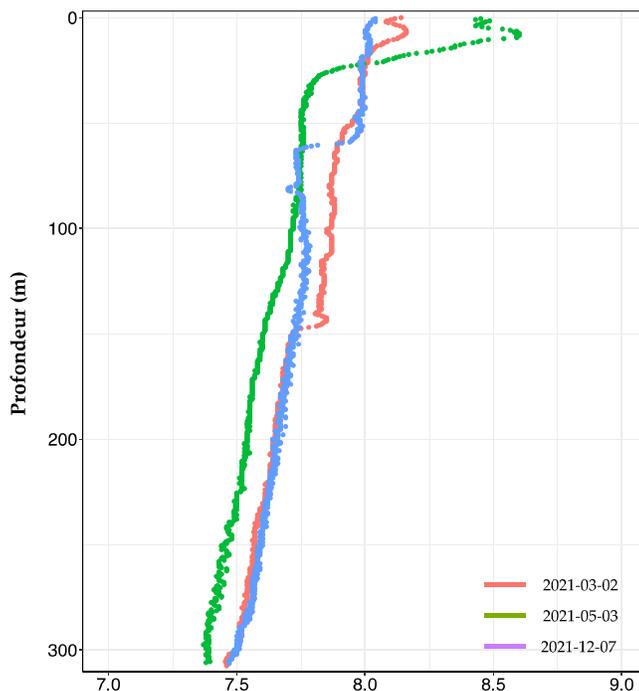


Figure 9 : pH des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal observable de la colonne d'eau (02/03/2021), de la reprise d'une activité photosynthétique significative et du pic phytoplanctonique (03/05/2021) et à l'issue de la déstratification de la colonne d'eau (07/12/2021), Léman - Grand Lac (SHL2).

Figure 9 : Vertical profiles of pH maximal observable water mixing (02/03/2021), during spring photosynthetic activity and during phytoplankton peak (03/05/2021) and after water column destratification (07/12/2021), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

4.3. OXYGENE DISSOUS

La figure 10 montre l'évolution des profils de concentration 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 12.9 mgO₂/L le 03/05/2021. Par la suite, la concentration en oxygène dissous dans la couche d'eau superficielle poursuit son augmentation pour atteindre la valeur maximale de 13.4 mgO₂/L le 14 juin 2021. Après cette date, la concentration en oxygène dans la couche 0-30 m diminue progressivement à cause de la baisse de l'activité photosynthétique et atteint une valeur de 9.7 mgO₂/L le 27 septembre 2021. Ce phénomène peut aussi s'expliquer par la diffusion d'oxygène vers la couche d'eau inférieure qui sont désoxygénées 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. A partir de l'automne, 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 15 m au mois d'octobre égal à 6.6 mgO₂/L en 2021. En 2021, le brassage hivernal ne permet pas de redistribuer l'oxygène dissous dans l'ensemble de la colonne d'eau. A l'issue de ce brassage, le 02 mars 2021, 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 inférieure au seuil de 4 mgO₂/L toute au long de l'année 2021.

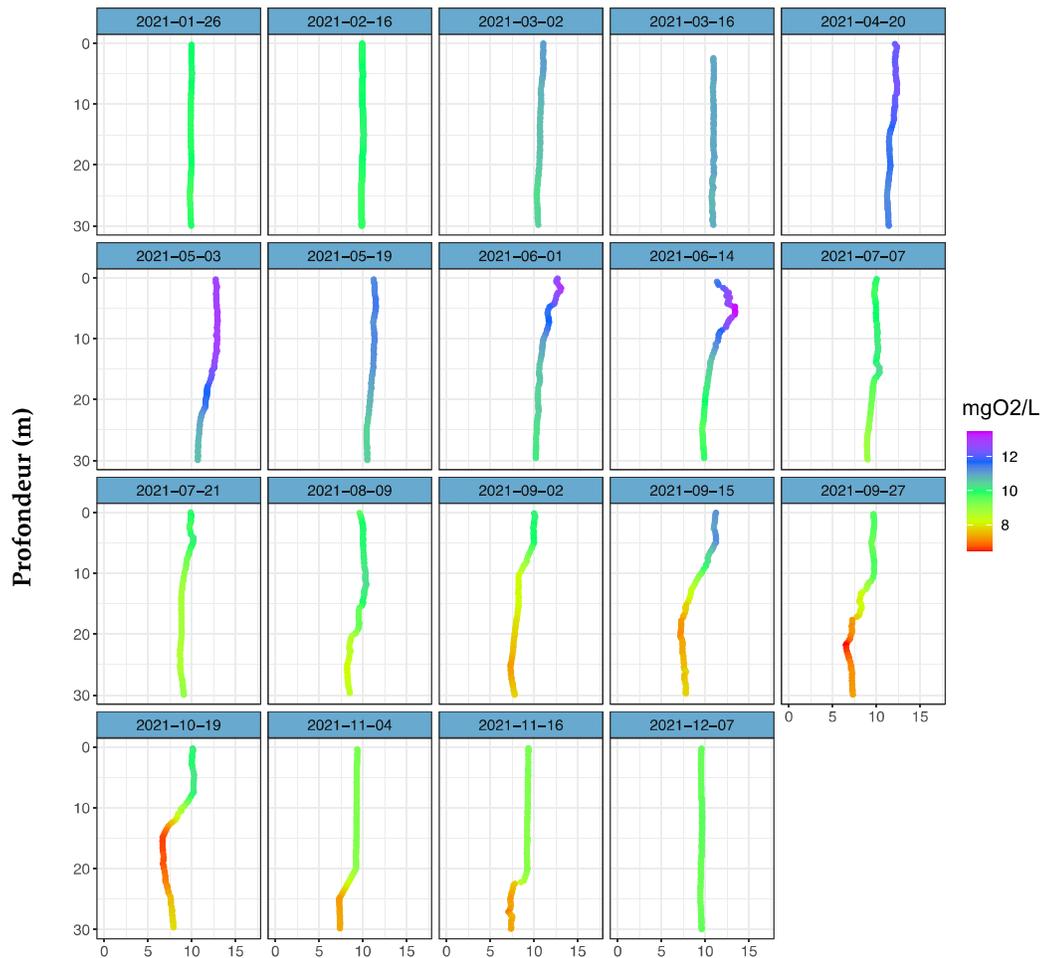


Figure 10 : Concentration en oxygène dissous entre 0 et 30 m de la colonne d'eau du lac, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 10 : Concentration of dissolved oxygen between 0 and 30 m of lake's water column, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

L'Annexe 2 de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998 stipule que : "Pour les lacs, il faut également que la teneur en oxygène de l'eau ne soit, à aucun moment et à aucune profondeur, inférieure à $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$; 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 11 présente la distribution de concentration en oxygène dissous à 309 m. Les brassages complets montrent un effet bénéfique en termes d'oxygène dissous pour le lac. Après le brassage complet en 2012, l'oxygène est de nouveau inférieur au seuil de $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ depuis 2016. En 2021, la répartition des concentrations en oxygène à 309m est comprise dans une faible gamme de variation : $1.8 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ (1^{er} quantile) et $2.9 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ (3^{ème} quantile). La valeur maximale est en dessous de $3 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$. La valeur minimale est de $1.4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$, soit la concentration la plus faible depuis 2012.

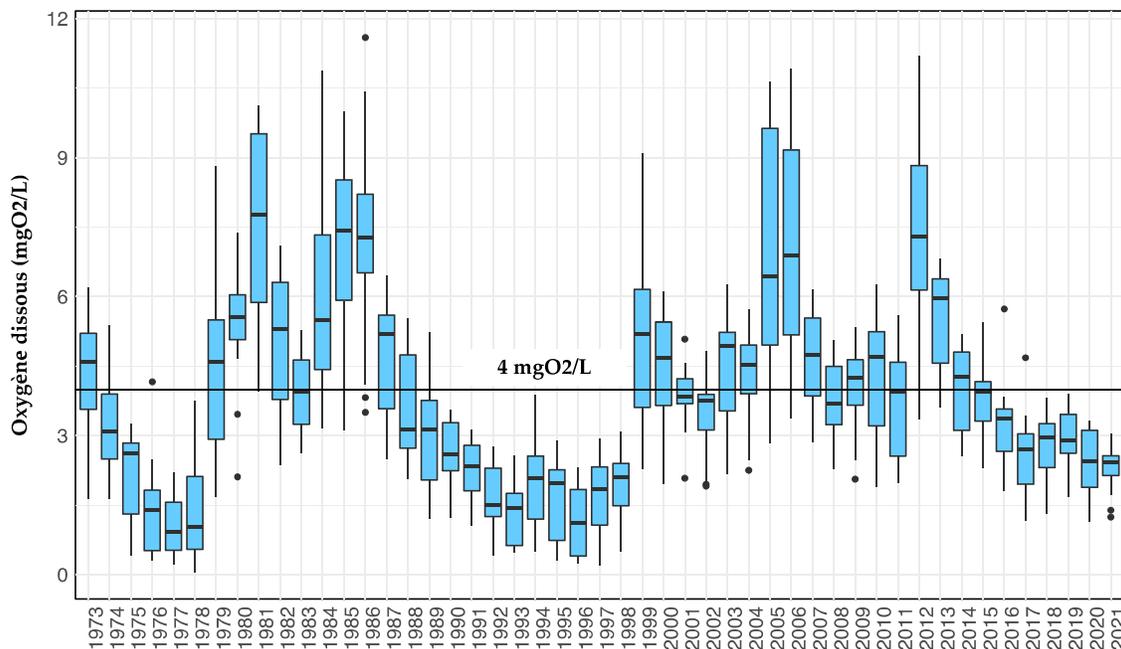


Figure 11 : Évolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux à 309 m de 1972 à 2021, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 11 : Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2021, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2).

La désoxygénation la couche d'eau profonde entraîne 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 suspension 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. Cette remise en suspension est indiquée par l'augmentation de la turbidité.

4.4. MATIÈRE PARTICULAIRE

La matière particulaire dans la couche d'eau superficielle est un indicateur de l'abondance phytoplanctonique en suspension dans l'eau. Le carbone et l'azote organique ainsi que le phosphore total particulaire représentent plus précisément la fraction de nutriments assimilés par le phytoplancton. Par conséquent, la variabilité saisonnière des concentrations en carbone organique particulaire (COP) dans la couche d'eau superficielle évoluent inversement à la teneur en nutriments dissous dans l'eau et ceci dès le début de l'activité phytoplanctonique.

Ainsi, le premier pic printanier du carbone organique particulaire est observé le 20 avril 2021 avec une valeur maximale de 526 µgC/L à 10 m (Figure 12). Le deuxième pic plus marqué du carbone organique particulaire est observé au mois de juin avec une valeur de 593 µgC/L. Les deux premiers pics du carbone organique correspondent aux périodes où la biomasse phytoplanctonique est importante (RIMET, ce rapport). Le troisième pic du carbone, qui est observé le 15 septembre 2021 avec une valeur de 513 µgC/L à 0m, pourrait correspondre au reste du bloom d'*Uroglena* en 2021.

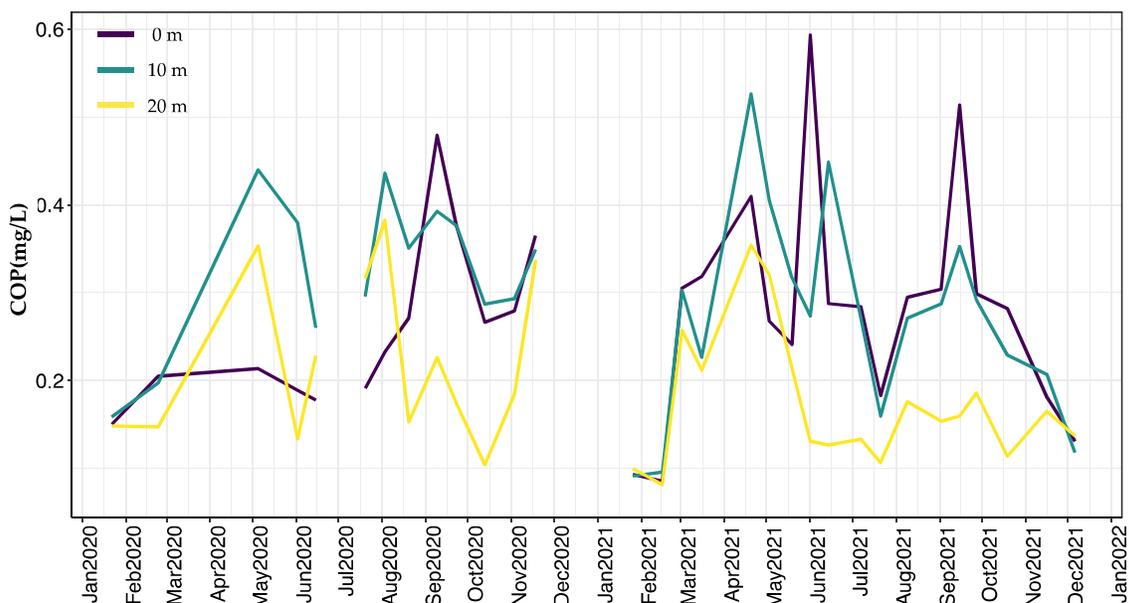


Figure 12 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches de 0, 10 et 20 m, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 12 : Concentration of particulate organic carbon in lake's water surface layers (0, 10, and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Les figures 13 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 1986.

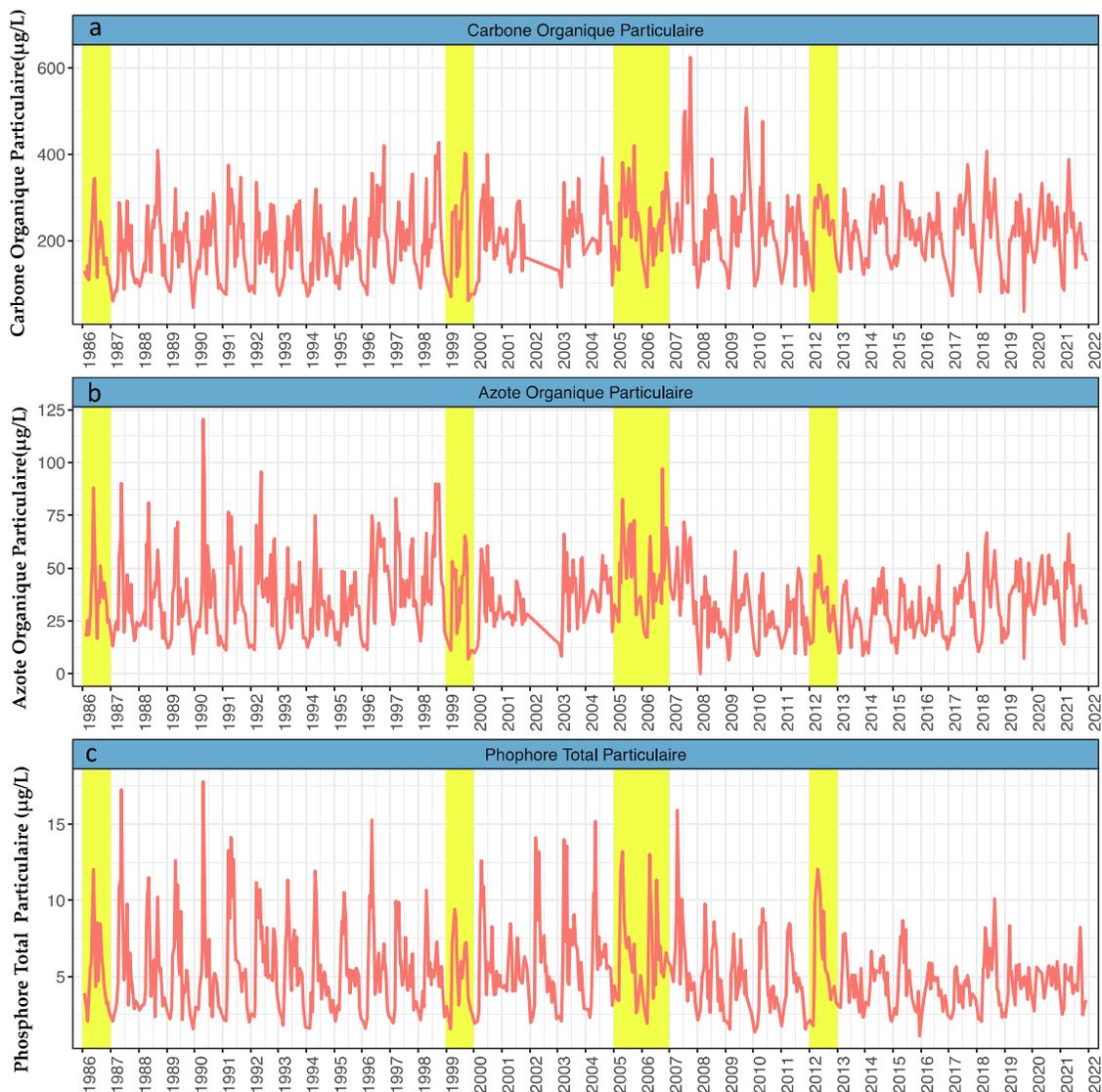


Figure 13 : Évolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche 0 - 20 m de 1986 à 2021, Léman - Grand Lac (SHL2) :

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

Figure 13 : Temporal change in particulate matter concentrations in the 0 - 20 m layer from 1986 to 2021, 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 14 décrit le rapport N/P entre 1986 et 2021 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. L'année 2021 indique une carence en phosphore moins importante que celle de l'année 2020.

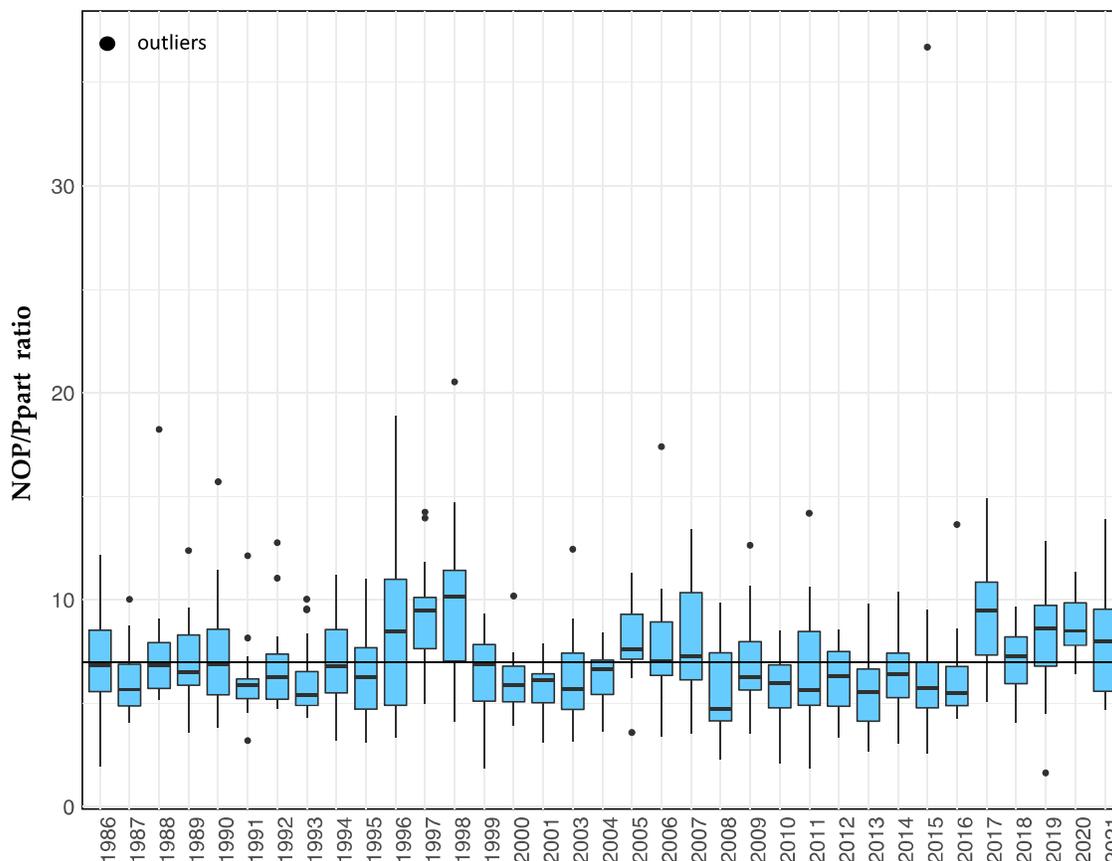


Figure 14 : Évolution du rapport Azote organique particulaire/ Ppart dans l'eau de la couche (0 - 20 m de 1986 à 2021, Léman - Grand Lac (SHL2))

Figure 14 : Change in NOP / Ppart ratio in the 0-20m layer from 1986 to 2021, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5. ELEMENTS NUTRITIFS

5.1. PHOSPHORE TOTAL ET ORTHOPHOSPHATES

Un brassage hivernal des eaux d'un lac permet de réoxygéner les eaux du fond mais également de remettre à disposition les nutriments dans la colonne d'eau à partir de la couche d'eau inférieure plus concentrée. Or, l'hiver 2021 n'a pas permis un brassage complet (Figure 4), par conséquent les nutriments n'ont pas été redistribués de manière homogène tout le long de la colonne d'eau (Figure 15).

La figure 15 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 2021. 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 3.7 $\mu\text{gP/L}$ dans la couche 0-30 m en 2021.

Dans la couche d'eau profonde (250-309 m), la concentration en orthophosphates présente une modification temporelle sur le long terme. Le brassage complet de la colonne d'eau contribue à une réduction très marquée 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 2021, elle est de 35.9 $\mu\text{gP/L}$. 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 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.

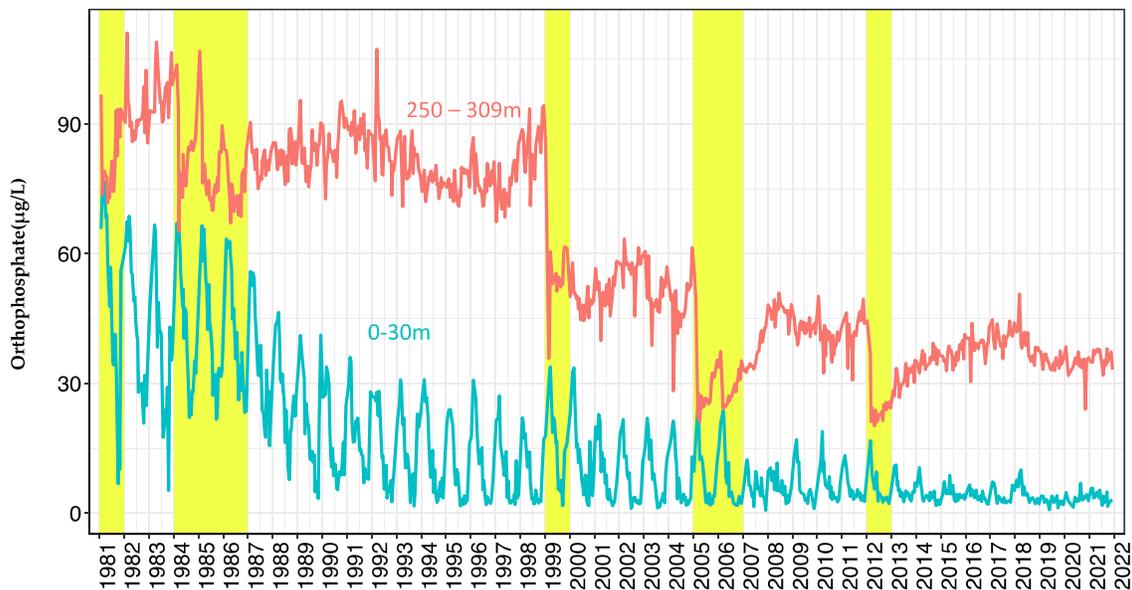


Figure 15 : Concentration moyenne pondérée en orthophosphates ($P-PO_4^{3-}$) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2021. Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 15 : 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 2021. The yellow shades indicate the complete winter mixing.

La figure 16 représente la moyenne pondérée du phosphore total ($P-P_{tot}$) dans la couche 0 - 30 m, et des eaux profondes (250-309 m) de 1981 à 2021.

La même observation que pour les orthophosphates est faite pour la concentration en phosphore total, à savoir la concentration en phosphore total diminuait progressivement dans les 30 premiers mètres et de façon nette au fond après chaque brassage complet 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 10.1 $\mu\text{gP/L}$. La concentration en phosphore totale dans la couche d'eau profonde est de 38.2 $\mu\text{gP/L}$.

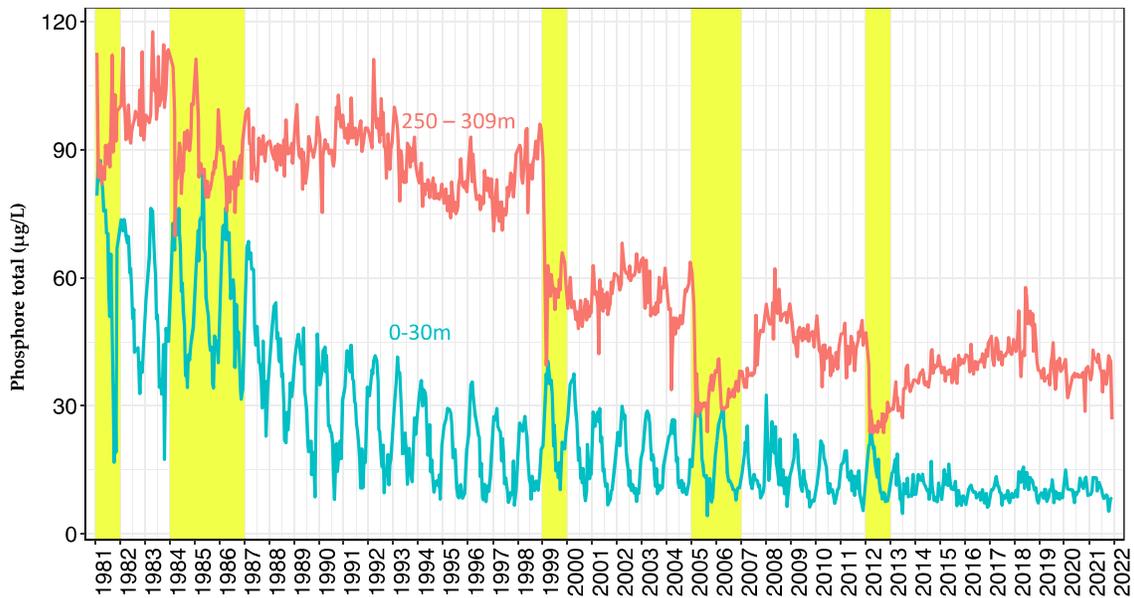


Figure 16 : Concentration moyenne pondérée en phosphore totale (P-Ptot) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2021. Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 16 : Concentration of total phosphorus (P-Ptot) in the 0-30m layers and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2021. The yellow shades represent the complete winter mixing.

En 2021, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total sur l'ensemble du grand lac est de 16.0 µgP/L, soit une légère diminution de 0.9 µgP/L par rapport à l'année 2020 (Figure 17). La concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphates est de 12.2 µgP/L en 2021, soit une diminution de 0.9 µgP/L par rapport à l'année 2020.

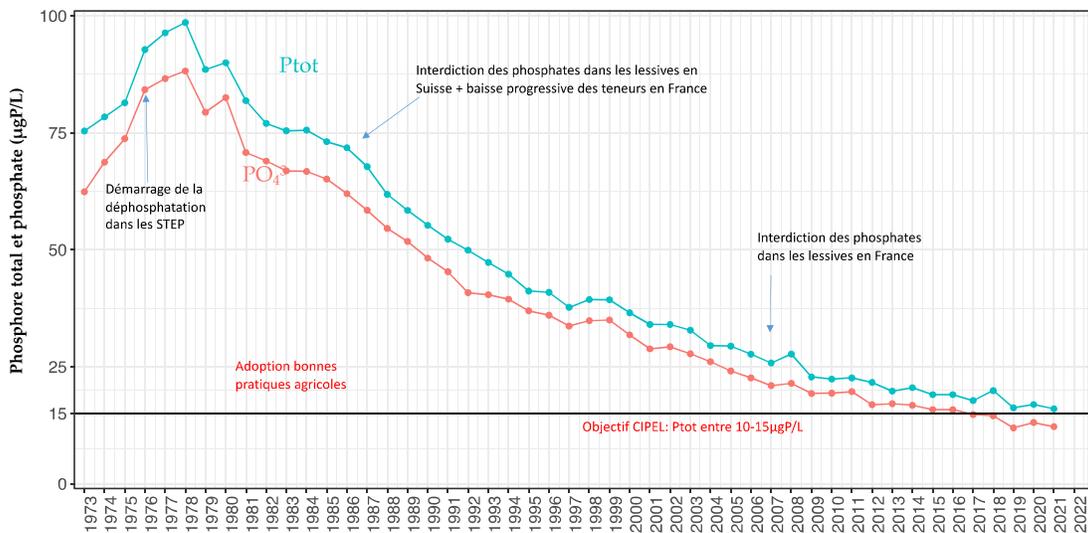


Figure 17 : Évolution de la concentration moyenne annuelle pondérée des orthophosphates et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2021, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 17 : Change in weighted mean annual total concentration of orthophosphate and total phosphorus in the entire mass of lake's water from 1973 to 2021, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.2. AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMMONIACAL

A l'issu du brassage hivernal, la concentration moyenne en azote nitrique, mesurée sur les 30 premiers mètres, était de 572 µgN/L, contre 544 µgN/L en 2020 (Figure 20). Elle atteint un maximum de 597 µgN/L le 16 février 2021, soit du même ordre de grandeur par rapport à l'année 2020. La concentration en azote nitrique de la couche d'eau 0-10 m diminue significativement dès la campagne suivant le brassage hivernal (Figure 18). Par la suite, la consommation de l'azote nitrique par l'activité phytoplanctonique se poursuit et la concentration de cet élément atteint un minimum de 228 µgN/L le 15 septembre 2021 après du bloom d'*Uroglena*. Cette diminution à cette période n'est pas spécifique pour l'année 2021. Dans les années précédentes, les faibles concentrations en nitrates à cette période peuvent correspondre aux pics du phytoplancton pendant l'automne. Par la suite, la consommation ralentit dès le mois d'octobre et les concentrations mesurées commence à augmenter pour atteindre une concentration moyenne, sur les 30 premiers mètres, de 510µgN/L en décembre 2021.



Figure 18 : 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 18 : Concentration of nitrate (N-NO₃⁻) in surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

En 2021, la concentration moyenne en azote total reste stable à 652 µgN/L par rapport à l'année 2020 avec 672µgN/L. La concentration moyenne annuelle en nitrates en 2021 est de 549 µgN/L et reste similaire à celle de 2020 (Figure 19). Les concentrations en nitrates dans les eaux du Léman restent conforme à l'exigence de l'ordonnance sur la protection des eaux Suisse qui édicte une limite à 5.6mgN/L.

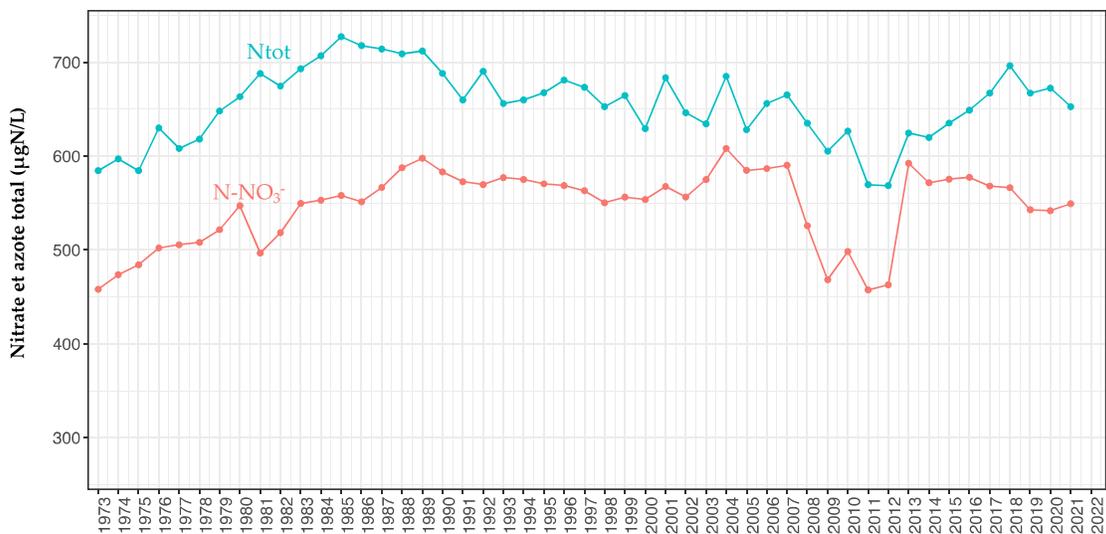


Figure 19 : Évolution de la concentration moyenne annuelle pondérée d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2021, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 19 : Change in the weighted mean annual total concentration of total nitrogen and nitrate in the entire mass of lake's water from 1973 to 2021, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La concentration en ammonium en 2021 est plus importante que celles des deux années précédentes en 2019 et 2020. La concentration moyenne en 2021 est de 11 µgN/L, soit supérieure de 2.0 µgN/L en 2019 et 3.3 µgN/L en 2020. En 2021, la valeur maximale est de 46 µgN/L le 19 mai 2021 par rapport à 34.52 µgN/L à 15 m le 20 juillet 2020 (Figure 20).

L'activité zooplanctonique entraîne une augmentation significative de la concentration en azote ammoniacal du fait 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 corréliser avec une activité zooplanctonique importante liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période (RIMET, ce rapport).

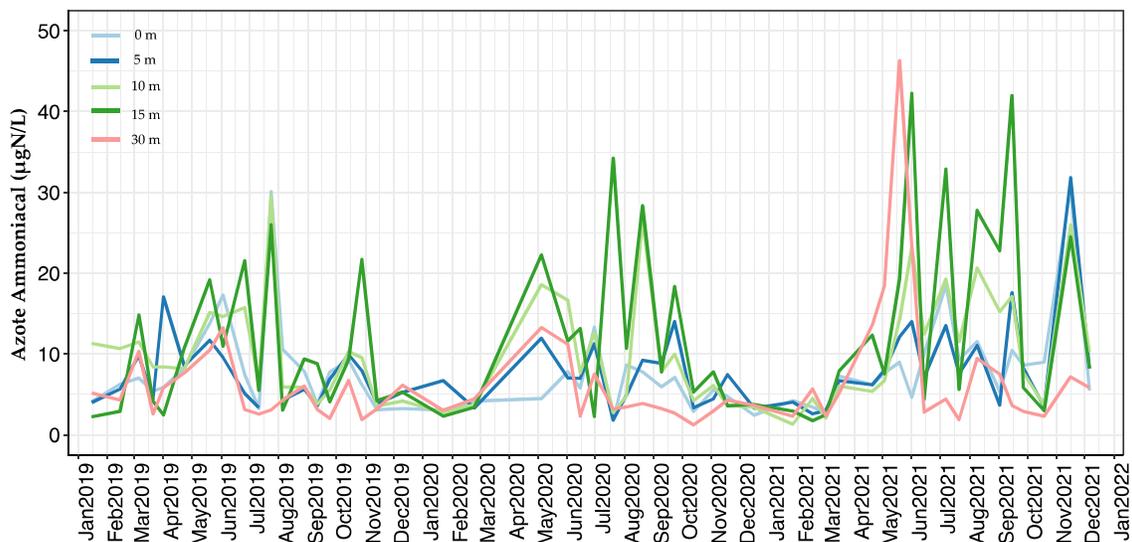


Figure 20 : Concentration en azote ammoniacal (N-NH₄⁺) dans l'eau de la couche d'eau superficielle (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

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

5.3. 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 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 le 16 février 2012. La concentration moyenne annuelle en 2021 est de 0.58 mgSiO₂/L, soit supérieure de 0.10 mgSiO₂/L par rapport à l'année 2020.

La concentration en silice diminue progressivement au cours des mois pour atteindre une valeur minimale de 0.20 mgSiO₂/L dès la reprise de l'activité phytoplanctonique le 20 avril 2021. Elle demeure faible jusqu'à juin 2021. Entre juin et novembre, elle augmente et se stabilise. En revanche, en comparaison avec la dynamique de la silice de l'année 2021, la concentration en silice est particulièrement faible le 09 août 2021 avec une valeur de 0.36 mgSiO₂/L.

A 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 des concentrations en silice du métalimnion, entraînant une nouvelle hausse des teneurs en silice en surface du lac (Figure 21). Depuis les derniers brassages complets 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. La concentration en silice diminue nettement dans la couche d'eau profonde après chaque brassage complet.

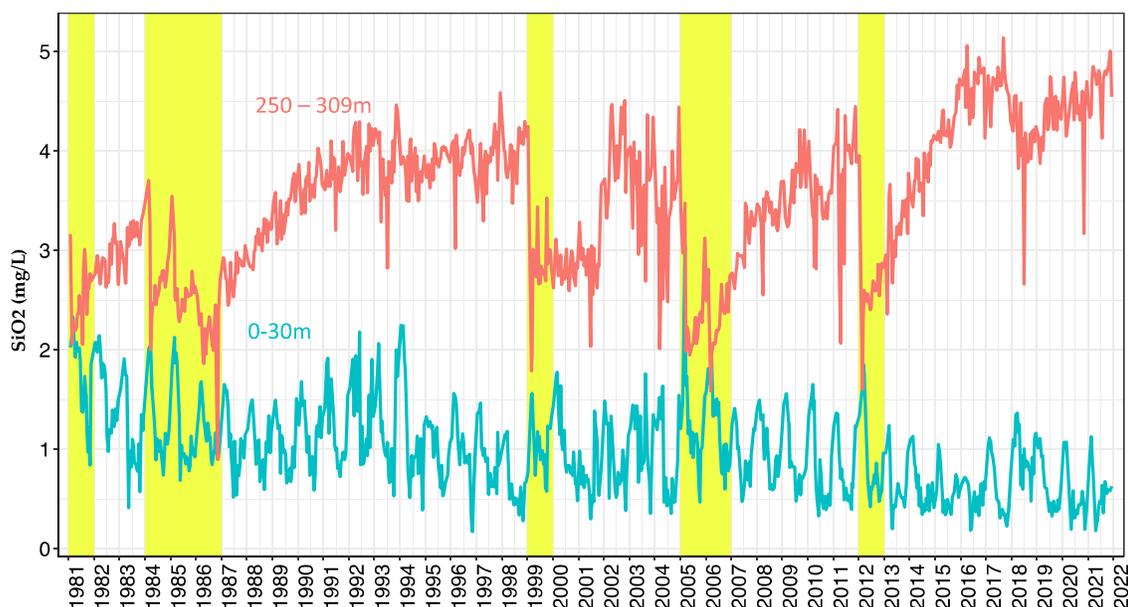


Figure 21 : Concentration moyenne pondérée en silice (SiO₂) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 – 309 m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2021. Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 21 : Concentration of silice (SiO₂) in the 0-30m layer and bottom layer (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2021. The yellow shades represent the complete winter mixing.

6. AUTRES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

6.1. CONDUCTIVITÉ

La conductivité permet de quantifier la somme des sels dissous présents dans l'eau. Cette mesure est aussi dépendante de la température, par conséquent, celle-ci est corrigée puis exprimée par convention à 25 °C.

La figure 22 représente l'évolution saisonnière de la conductivité dans la colonne d'eau du lac.

Au moment du brassage hivernal de 2021, la conductivité n'est pas homogène dans la colonne d'eau et varie entre 288 et 324 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Par la suite, la conductivité commence à diminuer de manière significative au début du printemps dans l'épilimnion à partir de la reprise de l'activité phytoplanctonique. Cette diminution de la conductivité est importante durant les mois estivaux. La photosynthèse induite par le développement du phytoplancton entraîne l'augmentation du pH qui modifie l'équilibre calco-carbonique et favorise la précipitation et la sédimentation de carbonate de calcium. Le calcium influençant significativement la conductivité, sa précipitation donne lieu à une diminution de cette dernière. On constate un décalage temporel entre l'augmentation du pH dans la couche d'eau superficielle qui débute dès le printemps et la diminution nette de la conductivité en été. La conductivité minimale dans l'épilimnion est observée le 15 septembre 2021 avec des valeurs aux alentours de 268 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de 0 à 30 m tel que cela est représenté sur la figure 22. De plus, on observe que la conductivité augmente dans l'hypolimnion au-delà de 50 m. Ce phénomène s'explique par la minéralisation de la matière organique par l'activité bactérienne qui induit une désoxygénation provoquant le relargage de plusieurs sels dissous.

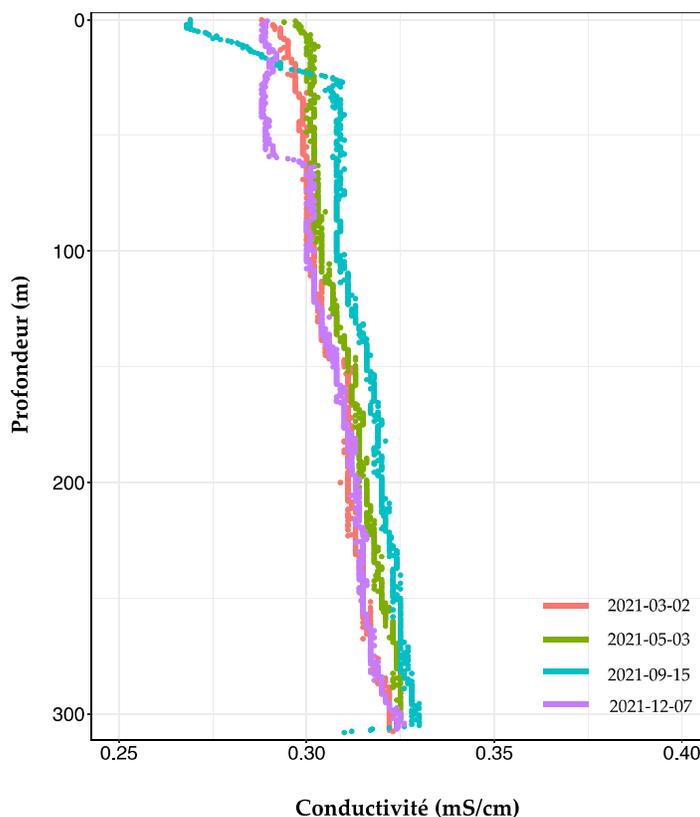


Figure 22 : Conductivité des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal (02/03/2021), lors du démarrage significatif de la précipitation du carbonate de calcium (03/05/2021), lors de sédimentation maximale du carbonate de calcium (15/09/2021) et lors de l'enfoncement maximal de la thermocline (07/12/2021), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 22 : Vertical profile of conductivity during maximal water mixing (02/03/2021), during the beginning of significant calcium carbonate precipitation (03/05/2021), during maximal calcium carbonate sedimentation (15/09/2021) and after thermocline deepening (07/12/2021), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

6.2. TITRE ALCALIMETRIQUE COMPLET

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est la grandeur utilisée pour mesurer la teneur d'hydrogénocarbonate, de carbonates et d'hydroxydes. La variation du TAC dans la colonne d'eau peut être expliquée par la précipitation des ions carbonates avec le calcium dans la couche d'eau superficielle et le relargage des sels dissous dans l'hypolimnion.

Dans les premiers mètres de la colonne d'eau, le titre alcalimétrique complet moyen pondéré varie entre 1.55 et 1.72 meq/L en 2021. Il reste élevé et stable aux alentours de 1.72 meq/L jusqu'à l'été et diminue parallèlement à la baisse de la conductivité ce qui s'explique par la précipitation des ions carbonates avec le calcium. Le titre alcalimétrique complet dans l'épilimnion est minimal au début de l'automne avec 1.55 meq/L. Finalement, le TAC augmente à nouveau dans la couche d'eau de surface à partir du mois d'octobre 2021 (Figure 23).

La figure 23 représente la moyenne pondérée du titre alcalimétrique des eaux en surface (0-30 m) et des eaux du fond (250-309 m) de 1981 à 2021. Dans les premiers mètres qui hébergent l'activité photosynthétique, la variabilité saisonnière du TAC est plus importante que dans la couche d'eau profonde en raison de la saisonnalité du développement phytoplanctonique. Après une baisse pendant la deuxième moitié des années 80, puis une hausse au cours du début des années 90, en accord avec l'évolution d'abondance du phytoplancton (ANNEVILLE et al. 2001). Dans la couche d'eau profonde, l'amplitude de la variation saisonnière du TAC est faible. Il reflète une tendance à l'augmentation avec un plateau depuis 2018.

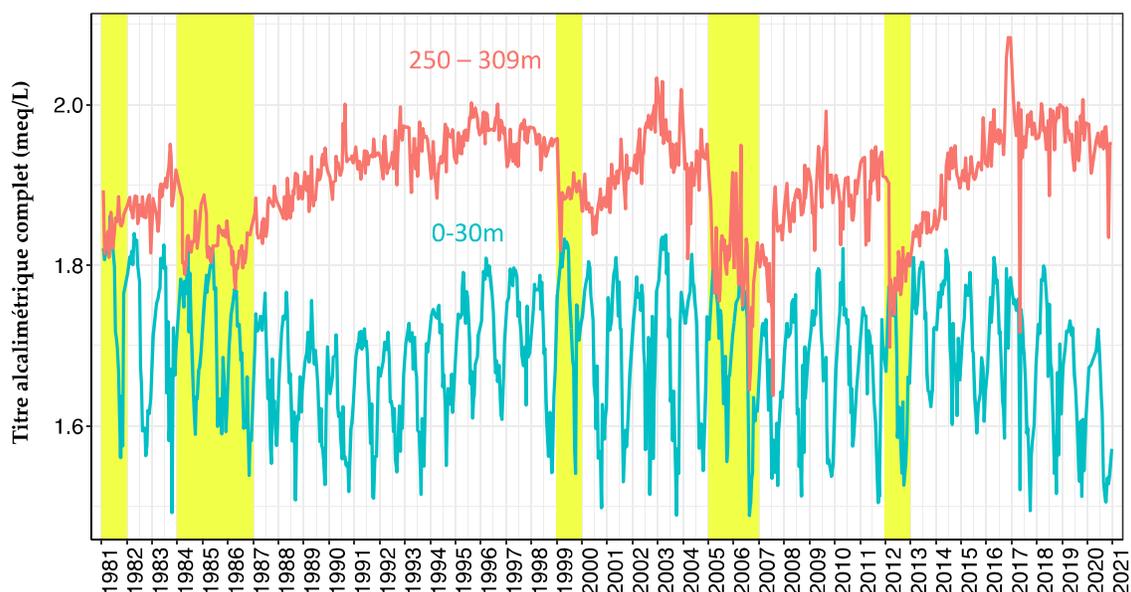


Figure 23 : Titre alcalimétrique complet moyen pondéré dans la couche 0-30 m et la couche profonde (250-309 m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2021. Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 23 : Weighted average total alkalinity in the 0-30m layer and bottom layer (250-309 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2021. The yellow shades represent the complete winter mixing.

6.3. CHLORURE

La concentration des ions chlorures dans le Léman sont en constante augmentation de 1973 à 2016 et semble s'être stabilisée depuis (figure 24). En 2021, le stock de chlorure est égal à 893 749 tonnes, soit une moyenne annuelle pondérée de 10.4 mg/L contre 886 212 tonnes et 10.3 mg/L en 2020. 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).

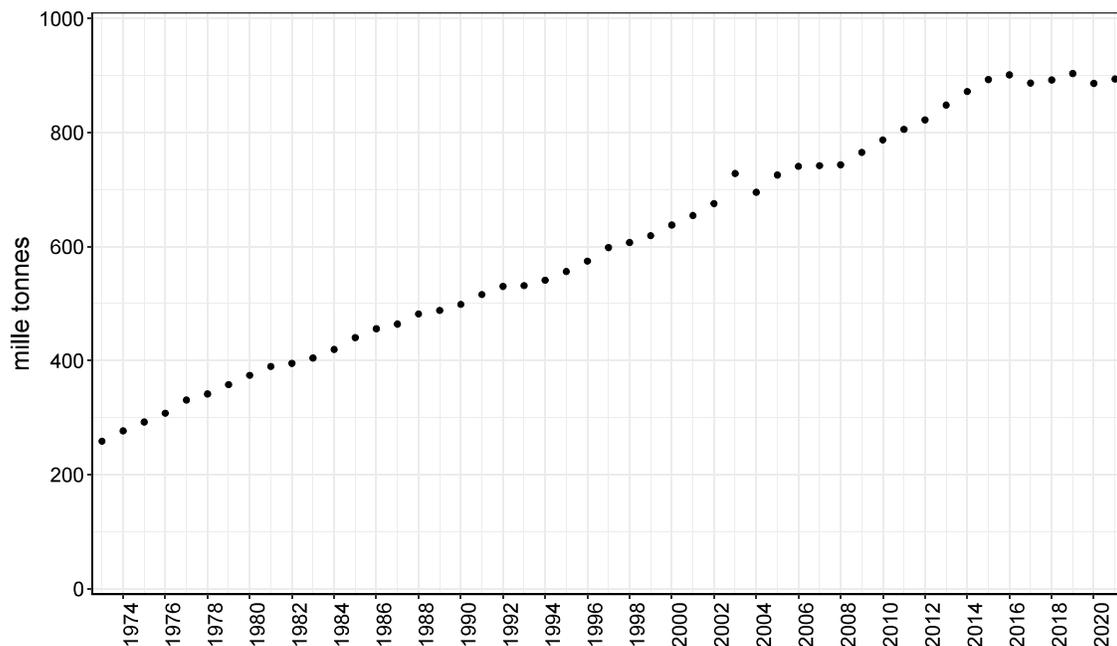


Figure 24 : Évolution du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2021, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 24 : Change in stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1973 to 2021, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

BIBLIOGRAPHIE

- Anneville O., Ginot V., Angeli N. (2001). Évolution de l'état de santé du Léman évaluée par l'analyse des séries chronologiques du phytoplancton. Rapp. Comm. Int. Prot. Eaux Léman contre pollut. Campagne 2000, 161-189.
- BLANC, P., PELLETIER, J.P. et MOILLE, J.P. (1993) : Variabilité spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques dans l'eau du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1992, 113-162 et 162b-162p.
- DOKULIL M., JAGSCH A., GEORGE G.D., ANNEVILLE O., JANKOWSKI T., WAHL B., LENHART B., BLENCKNER T., TEUBNER K. (2006) Twenty years of spatially coherent deepwater warming in lakes across Europe related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, 51, 2787-2793.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- RASCONI, S., ANNEVILLE, O., LAINE, L. (2022) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2011.
- RIMET, F. (2022) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2021.
- SOERE OLA-IS, AnaEE-France, INRAE Thonon-les-Bains, 2021, developed by Eco-Informatics ORE INRAE Team
- VARGAS, S. (2016) Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 217-224.

ANNEXES

ANNEXE I

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

$$C_{\text{moyenne pondérée}} = \frac{\sum Ci * Vi}{\sum Vi}$$

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	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						

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

ANNEXE II

Tableau 3 : Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2021, 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 2021, 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	µg P·L ⁻¹	µg P·L ⁻¹	µg N·L ⁻¹	µg N·L ⁻¹	µg N·L ⁻¹	µg N·L ⁻¹	mg Cl·L ⁻¹	µg C·L ⁻¹	µg N·L ⁻¹	µg P·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

b : valeurs interpolées

ANNEXE III

Tableau 4 : Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2021, Léman - Grand Lac (SHL2)

Table 4 : Annual total content in metric tons from 1957 to 2021, 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	144060	893750	7228	180	1211

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

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. Une comparaison avec la période 1981-2010 qui est remplacée, montre que la Suisse est devenue plus chaude et le plateau plus ensoleillé. Aucun changement majeur n'est visible pour les précipitations.

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'INRA 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.

Au niveau de l'inter-stations du Léman, le passage à la période 1991-2020, entraîne pour la température une augmentation de 0.4 °C par rapport à 1981-2010. Pour l'insolation l'augmentation est de 96.5 h, ce qui engendre une augmentation du rayonnement global de 0.5 MJ·m⁻²·d⁻¹. La normale du vent moyen à Changins a baissé de 0.15 m·s⁻¹, et le nombre de jour ou la vitesse de vent moyen est supérieur à 5 m·s⁻¹ a baissé de 10 jours. Comme pour le reste de la Suisse, il n'y pas de différence entre les 2 périodes pour la pluviométrie.

2. TEMPÉRATURE DE L'AIR

En 2021, trois mois ont eu leurs températures moyennes supérieures à leurs normales : février (+2.5 °C), juin et septembre. Quatre mois avec températures conformes à leurs normales : janvier, mars, octobre et décembre. Et donc cinq mois avec des températures inférieures à leurs normales : avril, mai (-2.4 °C), juillet août et novembre (tableau 1.1, figure 1.1).

Tableau 1.1 : Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2021 (°C).

Table 1.1 : Mean monthly air temperature for each station in 2021 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1991 - 2020
Janvier	2.3	2.0	2.3	3.0	2.6
Février	5.5	5.5	5.9	5.8	3.2
Mars	6.7	6.6	6.9	7.1	6.9
Avril	9.4	9.4	9.4	9.4	10.5
Mai	12.3	11.8	12.2	12.4	14.6
Juin	19.9	19.4	19.7	20.2	18.4
Juillet	19.6	19.2	19.6	19.9	20.6
Août	18.8	18.4	19.0	19.3	20.2
Septembre	17.2	17.0	17.7	18.0	16.0
Octobre	10.4	10.5	11.3	11.7	11.6
Novembre	5.2	5.2	5.9	6.4	6.5
Décembre	3	2.9	3.2	3.9	3.3
Moyenne	10.9	10.7	11.1	11.4	11.2

En 2021, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.0°C. L'année 2021 se classe au 18e rang (sur 31) de la chronologie 1991 - 2021 (la 1ere étant 2018 et 2020 avec 12.3 °C, 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
1990	11.2	2006	11.3
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

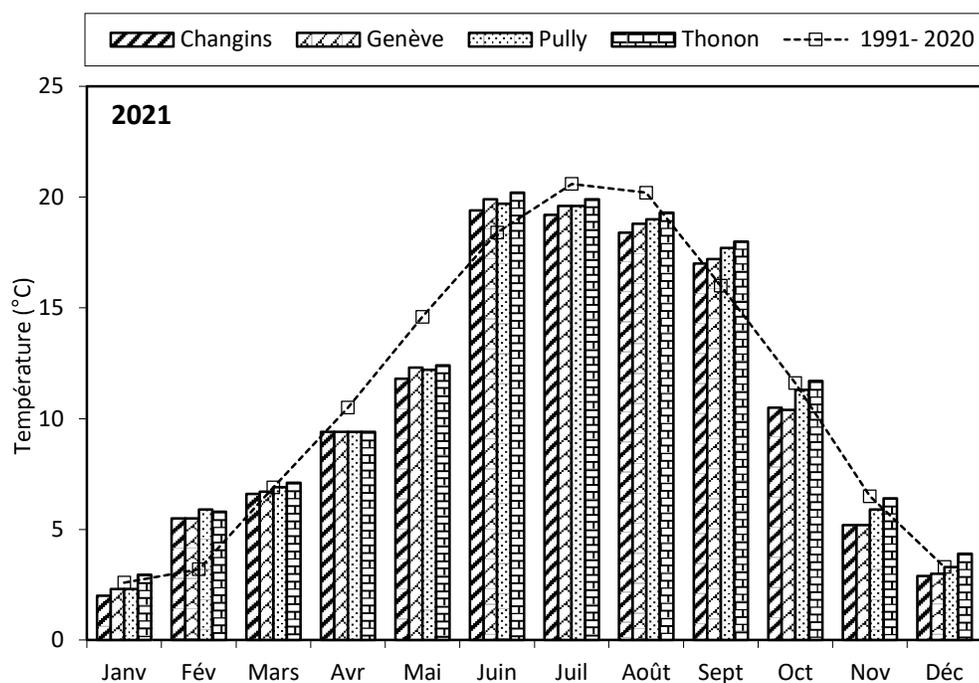


Figure 1.1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2021 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 1.1 : Mean monthly air temperature at each station in 2021 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

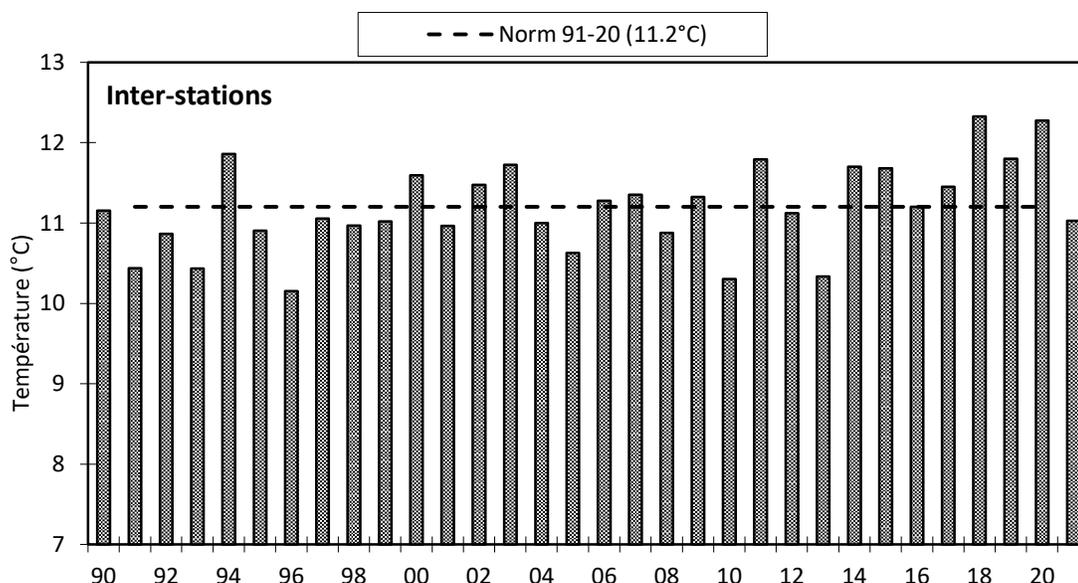


Figure 1.2 : Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

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

3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2021 sur le bassin lémanique est de 1'104.3 mm, soit 98 mm supérieur à la normale inter-stations (1'006.2 mm) relevée sur les 4 stations entre 1991 et 2020. Ce qui fait de l'année 2021 une année relativement humide. Pully est la station la plus arrosée avec 1'323 mm, Genève avec 867 mm à les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

Après un mois de janvier pluvieux, la pluviométrie du trimestre suivant est déficitaire. Puis suivi par un trimestre excédentaire (surtout pour le mois de juillet où elle est 2.3 fois supérieure à la normale de ce mois), la pluviométrie relevée du mois d'août à novembre fut déficitaire. L'année 2021 s'est terminée par un mois de décembre excédentaire.

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	96.1	143.3	149.0	104.0	72.7
Février	30.7	34.8	33.5	27.5	58.5
Mars	36.4	44.7	52.7	46.0	64.4
Avril	23.1	29.7	49.7	46.0	73.0
Mai	122.2	160.1	168.7	157.0	92.6
Juin	106.3	128.9	181.1	136.0	91.0
Juillet	132.3	181.8	294	215.0	88.3
Août	54.1	68.4	71.4	68.5	91.5
Septembre	36.7	19.4	59.3	47.0	90.1
Octobre	80.6	84.8	72.8	84.0	100.2
Novembre	19.4	27.9	29.2	28.0	91.8
Décembre	129.2	168.6	161.4	136.0	92.1
Total Annuel	867.1	1'132.4	1'322.8	1'095.0	1'006.2

En inter-stations, l'année 2021 se classe au 9^e rang (sur 31) de la chronologie pluviométrique 1991 - 2021 (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
1990	1'093.9	2006	1'069.2
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

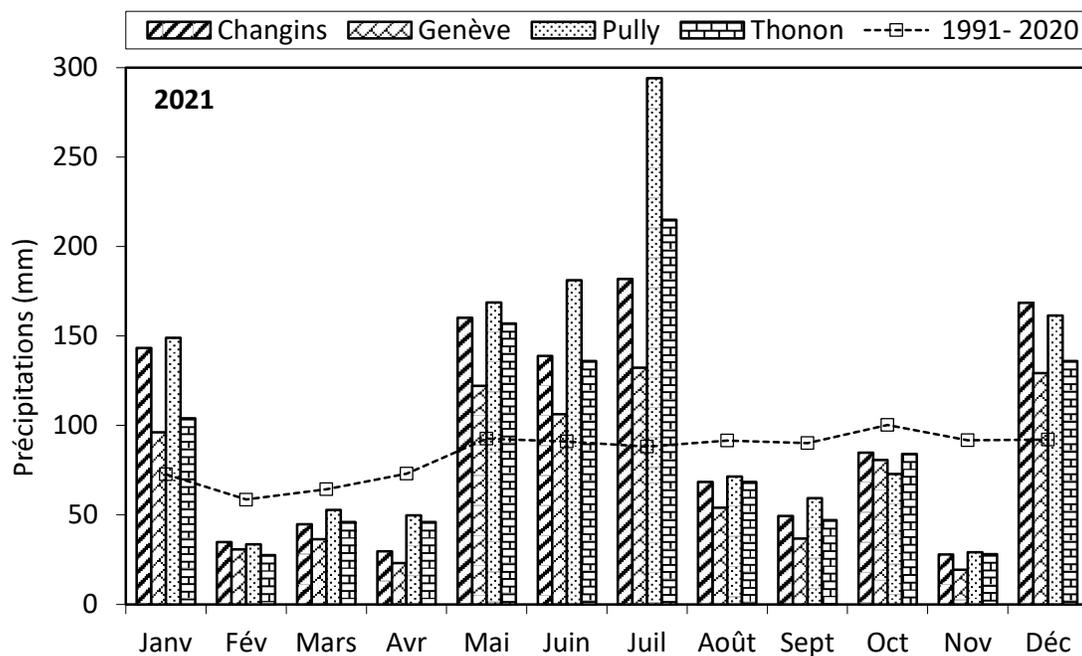


Figure 2.1 : Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2021 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 2.1 : Monthly rainfall at each station in 2021 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

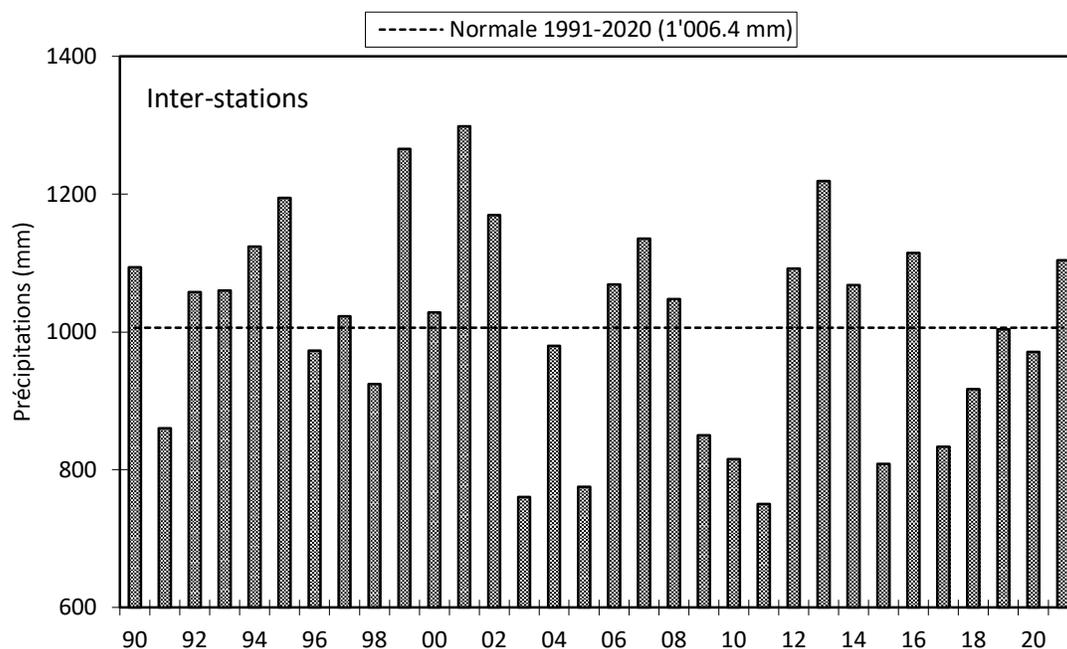


Figure 2.2 : Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

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

4. INSOLATION

Après des mois de janvier et février où l'insolation mesurée fut conforme à la normale, les mois de mars et avril furent eux très excédentaires (+40 et 53 h). Les mois de mai et juillet furent eux déficitaires (-25 et 44 h) (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 : Insolation mensuelle à chaque station en 2021 (h).

Table 3.1 : Monthly insolation at each station in 2021 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1991 - 2020
Janvier	49	60	57	43	66.4
Février	100	107	105	109	102.4
Mars	217	212	191	213	168.5
Avril	244	245	237	269	195.4
Mai	189	178	176	236	220.0
Juin	241	232	228	301	250.2
Juillet	220	216	212	252	269.4
Août	250	247	244	267	243.9
Septembre	187	198	201	192	189.4
Octobre	167	178	186	161	124.1
Novembre	53	63	58	45	70.2
Décembre	34	38	47	24	51.0
Total annuel	1'950.5	1'975.1	1'939.8	2'111.7	1'950.9

L'année 2021 avec une moyenne inter-stations de 1'994.3 heures est une année moyennement ensoleillée. Elle se classe quatorzième sur la période 1981 - 2021 (la 1^e étant 2003 avec 2'290 h, la dernière étant 1993 avec 1'669.2h) (tableau 3.2, 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
1990	1'973.2	2006	1'992.4
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

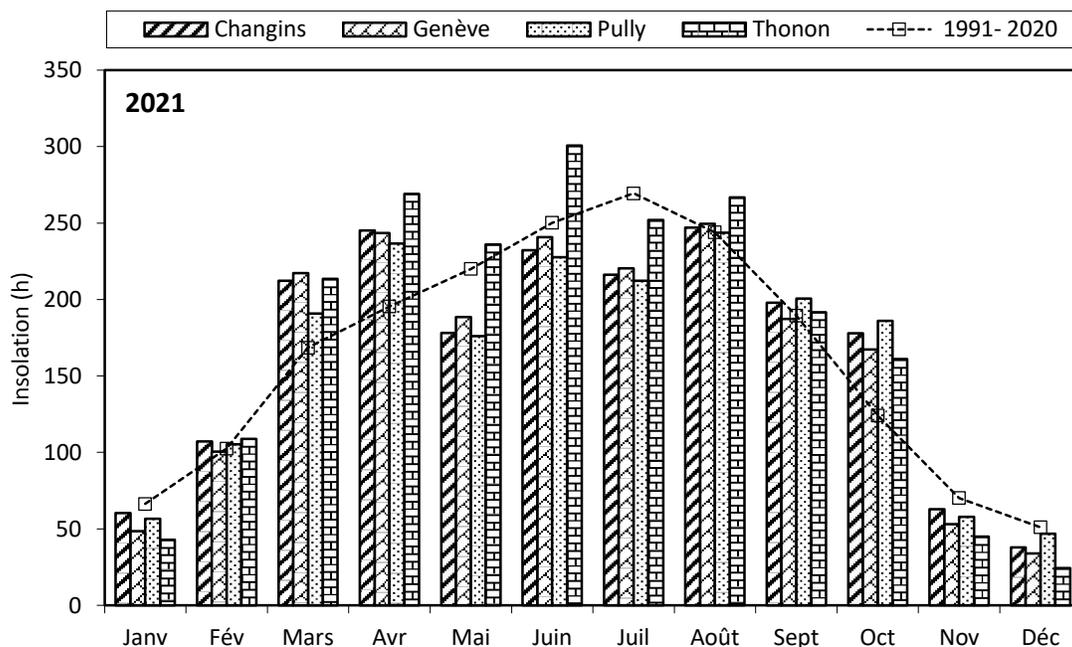


Figure 3.1 : Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2021 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 3.1 : Monthly insolation at each station in 2021 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

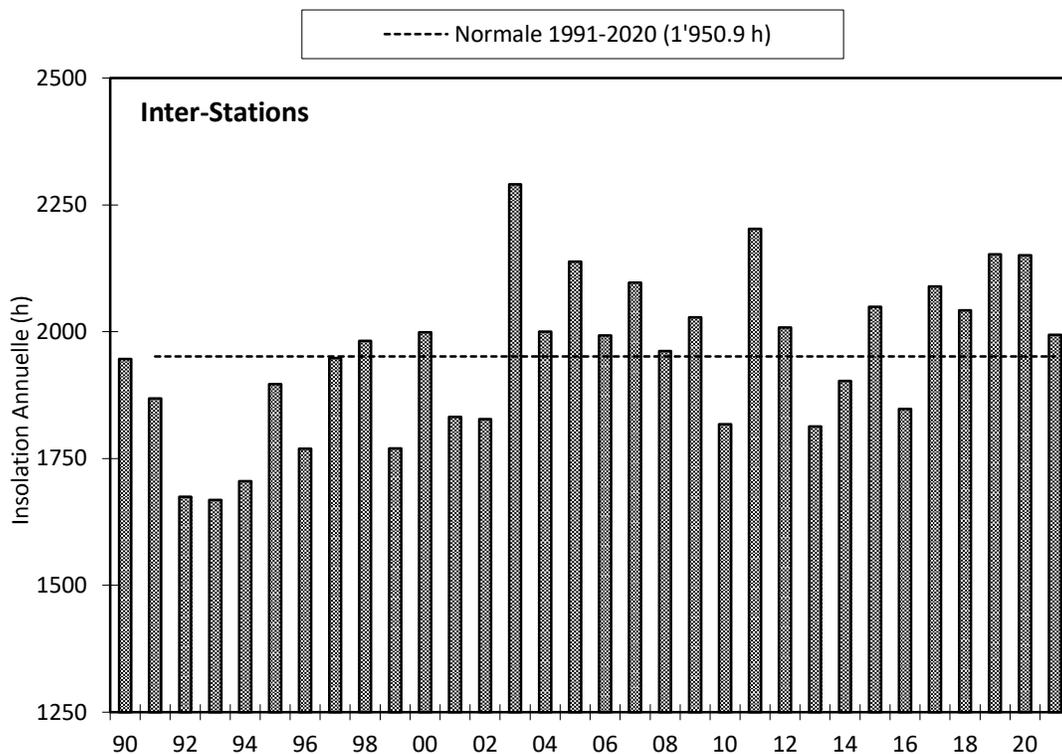


Figure 3.2 : Insolation annuelle de l'inter-stations.

Figure 3.2 : Annual insolation at the inter-stations.

5. RAYONNEMENT

La moyenne inter-stations pour l'année 2021 est de 13.3 MJ·m⁻²·d⁻¹ (tableau 4.1, figure 4.1).

Tableau 4.1 : Rayonnement global mensuel à chaque station en 2021 (moyenne journalière en MJ·m⁻²·d⁻¹).

Table 4.1 : Global monthly solar irradiation at each station in 2021 (mean daily irradiation in MJ·m⁻²·d⁻¹).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1991 - 2020
Janvier	3.6	4.1	3.7	3.0	3.8
Février	7.8	7.9	7.7	7.1	7.0
Mars	15.0	14.4	13.5	13.	11.9
Avril	20.1	19.9	19.5	19.6	16.5
Mai	19.4	18.3	18.3	19.3	19.6
Juin	24.1	23.2	22.6	24.3	22.2
Juillet	21.2	20.2	19.8	20.6	21.9
Août	20.3	19.9	19.4	19.6	18.7
Septembre	14.7	14.6	14.6	13.9	13.9
Octobre	10.0	10.0	10.2	9.4	8.2
Novembre	4.4	4.5	5.3	3.4	4.4
Décembre	2.5	2.8	3.0	2.1	3.0
Moyenne Annuelle	13.6	13.3	13.1	13.0	12.6

Pour l'inter-stations en 2021, le rayonnement global annuel obtenu est de 4'840. MJ·m⁻², ce qui classe l'année, neuvième sur la période 1991 – 2021 (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
1990	4'401	2006	4'593
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

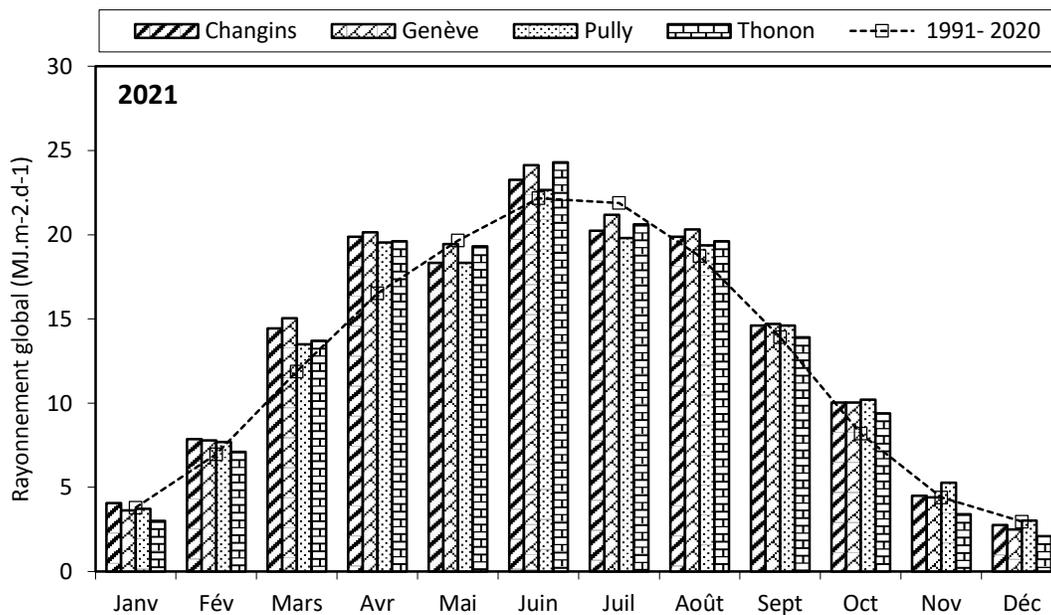


Figure 4.1 : Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2021 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 4.1 : Mean monthly global solar irradiation at each station in 2021 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve).

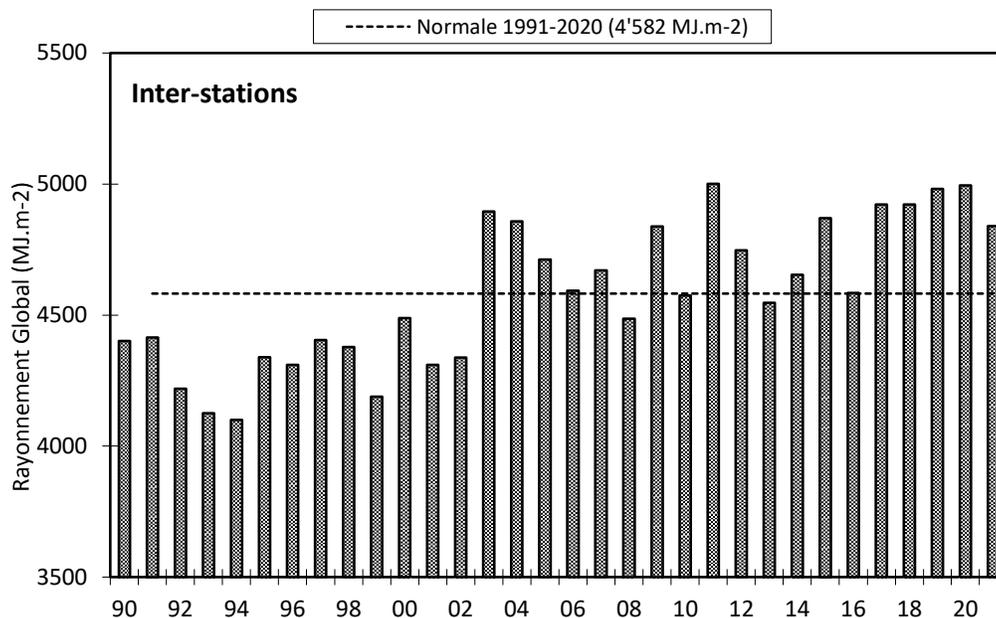


Figure 4.2 : Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m⁻²).

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

6. VENT

6.1. VITESSE DU VENT

En 2021 à Changins, station de référence, le 1^{er} semestre fut venteux à l'exception des mois de février et juin. Le second semestre fut également venteux à l'exception des mois de juillet, septembre et décembre pour lesquels les moyennes mensuelles furent inférieures à celles calculées sur la période 1991-2020 (tableau 5.1, figure 5.1 et tableau 5.2).

Tableau 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse du vent en 2021 (m.s⁻¹)

Table 5.1 : Mean monthly wind speeds in 2021 (m.s⁻¹).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1991-2020
Janvier	2.5	3.0	1.9	1.8	2.5
Février	2.8	2.5	1.7	1.7	2.8
Mars	3.3	3.3	1.9	2.0	3.1
Avril	3.6	3.6	2.2	1.9	3.0
Mai	2.8	2.8	1.9	1.4	2.8
Juin	2.2	2.2	1.7	1.0	2.6
Juillet	2.5	2.5	1.7	1.1	2.6
Août	2.5	2.8	1.9	1.6	2.6
Septembre	1.7	1.9	1.7	0.9	2.4
Octobre	2.2	2.5	1.9	1.4	2.3
Novembre	2.5	2.5	1.9	2.0	2.3
Décembre	1.9	2.2	1.4	0.9	2.5
Moyenne annuelle	2.5	2.7	1.8	1.5	2.6

Pour l'année 2021 à Changins, il a été enregistré 28 jours de vent fort ($> 5 \text{ m.s}^{-1}$) dont 19 jours durant le 1^{er} semestre (avec 12 jours pour le 1^{er} trimestre). Le maximum de vent moyen journalier a été relevé pour l'année 2021 avec la même vitesse de 8.86 m.s^{-1} le 20 mars, 3 avril et le 18 juillet m.s^{-1} (figure 5.2). De plus, il y a eu en 2021, 5 jours où la vitesse du vent a été enregistrée à 4.99 m.s^{-1} (que l'on peut intégrer au nombre de jours à vent fort, car les données de vent sont fournies arrondies et en km/h).

Tableau 5.2 : Vent moyen annuel à Changins (m.s^{-1}).

Table 5.2 : Mean annual wind speed at Changins (m.s^{-1}).

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1990	3.1	2006	2.4
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

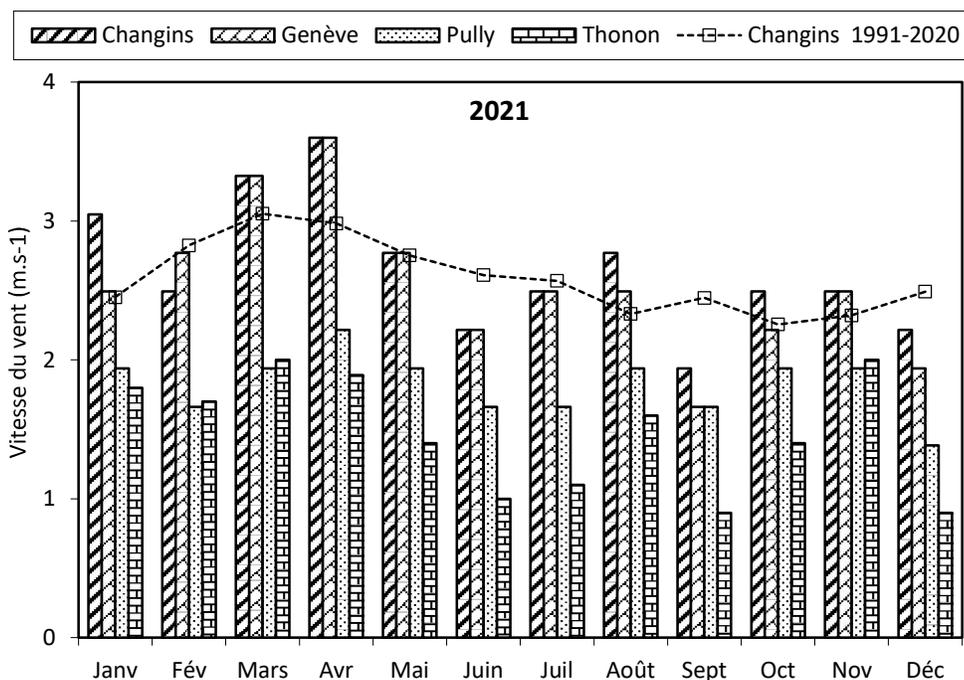


Figure 5.1 : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2021 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1991 - 2020 (courbe).

Figure 5.1 : Mean monthly wind speeds at each station in 2021 (histogram), and at Changins for the period 1991 - 2020 (curve).

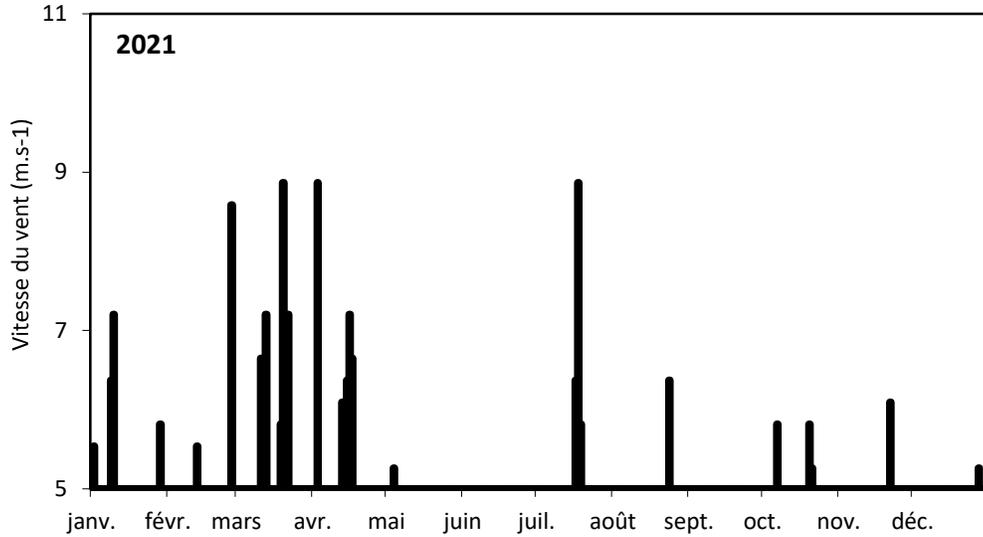


Figure 5.2 : Répartition annuelle (en 2021) des vents forts (> 5 m.s⁻¹) à Changins.

Figure 5.2 : Annual distribution (in 2021) of strong winds (> 5 m.s⁻¹) at Changins.

6.2. ROSE DES VENTS

Pour l'année 2021 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⁻¹. Les vents qui sont supérieurs à 5 m.s⁻¹ 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.

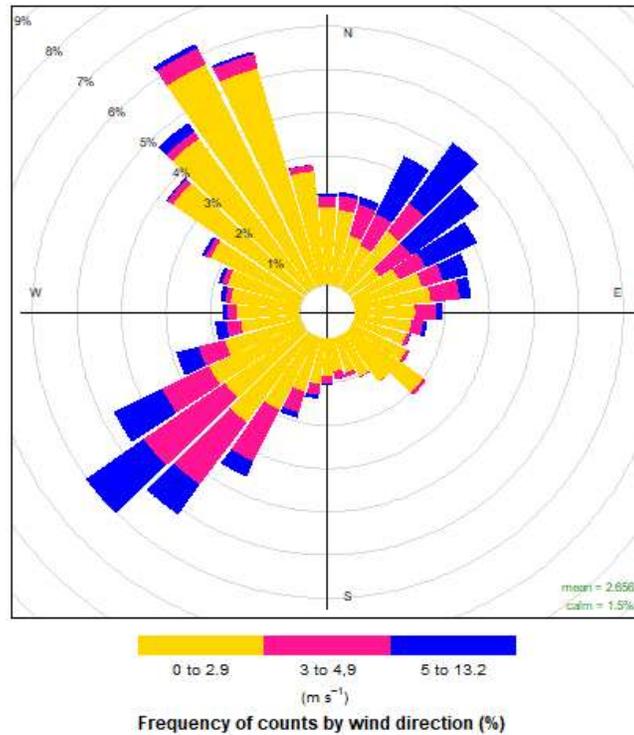


Figure 5.3 : Rose des vents à Changins en 2021 (pourcentage d'occurrence des vents horaires par direction et par classe de force).

Figure 5.3 : Wind rose at Changins in 2021 (frequency of hourly wind direction occurrence by strength).