

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

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

CAMPAGNE 2020

Viet TRAN KHAC, Philippe QUETIN et Orlane ANNEVILLE

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (INRAE-UMR/CARTEL)

CS 50511, FR - 74203 THONON-LES-BAINS CEDEX

Résumé

L'année 2020 est l'année la plus chaude enregistrée en France depuis 1900 selon Météo-France. Au niveau local, comme en 2018, la température moyenne de l'air inter-stations est de 12.3°C. Cette température est supérieure de 1.5 °C à la normale de la période 1981-2010. L'année 2020 présente un ensoleillement en dessus de la normale, et ce en particulier pour les mois entre février et juin. La pluviométrie est légèrement en dessous de la normale de la période 1981-2010.

L'absence de données pour les mois de mars et d'avril nous contraint dans la détermination de la profondeur maximale de brassage hivernal. Néanmoins, il semblerait que cette dernière aurait atteint 120 m, ainsi l'hiver 2020 n'aurait pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. Depuis le dernier brassage hivernal complet en 2012, la température de l'eau au fond du lac a augmenté de 0.81 °C. Les couches d'eau profondes n'ayant pas été réoxygénées par le brassage hivernal, la concentration en oxygène dissous à 309 m reste inférieure à 4 mgO₂/L tout au long de l'année 2020.

La phase des eaux claires a été bien observée le 30 juin 2020 avec une transparence de 10.7 m.

La concentration moyenne annuelle en phosphore total se stabilise en atteignant 16.92 µgP/L. La concentration moyenne annuelle en orthophosphates est de 13.05 µgP/L indiquant une augmentation de 1.14 µgP/L par rapport à l'année 2019

La teneur en chlorures se stabilise autour d'une concentration moyenne annuelle de 10.30 mg/L.

Abstract

According to Météo-France, 2020 was the hottest year on record in France since 1900. At regional level, the years 2018 and 2020 were both the hottest years since 1981. The inter-station annual average temperature was 12.3°C. It was 1.5°C above the 1981 – 2020 climate normals. The year 2020 was hot with above climate normals sunshine, in particular for the months from February to June. Rainfall is slightly below the 1981-2020 climate normals.

Due to the lack of data for the months March and April, the winter mixing depth was determined with large uncertainty. Nevertheless, it seems that the partial mixing would have reached 120m. Since the last complete winter mixing in 2020, the water temperature of lake bottom has risen by 0.81°C. Deep water layers were not reoxygenated. The dissolved oxygen at 309m remained 4mg/L throughout the year 2020.

The clear water period was observed on 30 June 2020 with 10.7m of water transparency

In 2020, the annual average concentration of total phosphorus stabilizes at 16.92 µgP/L. The annual average concentration of orthophosphate was 13.05 µgP/L, which represents an increase of 1.14 µgP/L compared to the year 2019.

The chloride concentration continued to stabilize around 10.30mg/L

1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman réalisé dans le Grand Lac à la station SHL2 en 2020, 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 2020 (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-INRA.

Le présent rapport utilise les données du suivi environnemental du Léman fournies par l'Observatoire OLA (Observatoire des Lacs Alpains) pour la période 1973-2020 (SOERE OLA-IS 2020).

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)

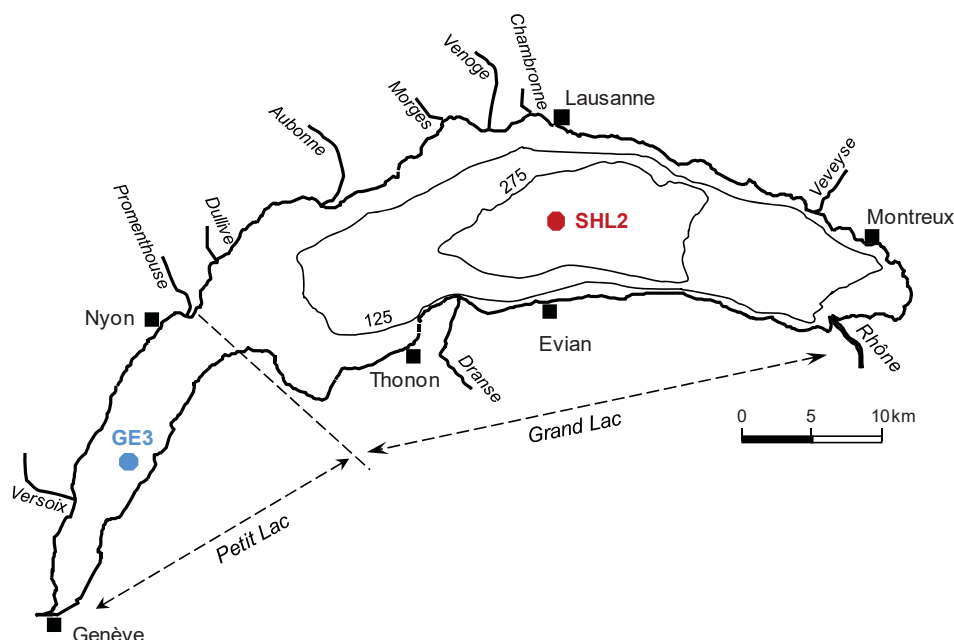


Figure 1 : Situation des points de prélèvement pour le suivi de la CIPEL sur le Léman

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 et que le lac subit de fortes et rapides fluctuations des conditions environnementales.

En raison de la crise sanitaire liée à la pandémie COVID 19, les prélèvements n'ont pas eu lieu pour les mois de mars et d'avril 2020. Par conséquent, il y a eu 15 campagnes de prélèvements en 2020, 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 n°	Date	Campagne n°	Date
1	22.01.2020	11	23.09.2020
2	24.02.2020	12	13.10.2020
3	05.05.2020	13	03.11.2020
4	02.06.2020	14	18.11.2020
5	15.06.2020	15	16.12.2020
6	30.06.2020		
7	20.07.2020		
8	03.08.2020		
9	20.08.2020		
10	09.09.2020		

Les prélèvements sont effectués selon des techniques uniformisées par l'UMR CARTEL 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 Ecosystèmes 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 CARTEL INRAE de Thonon-les-Bains. Les méthodes analytiques utilisées sont selon les normes de qualité de l'eau normalisées AFNOR et sont comparées par des analyses inter-laboratoires auxquelles participent environ 20 laboratoires. Les derniers résultats obtenus en octobre 2015 par les différents laboratoires sont concordants (VARGAS, 2016). 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, des profils verticaux (mesures à chaque mètre) de température, oxygène dissous, conductivité électrique, pH et chlorophylle *a in vivo* sont réalisés à l'aide d'une sonde multi-paramètres immergeable. Dans le même temps, une mesure de la transparence est effectuée en observant la profondeur de disparition d'un disque de Secchi. De 1957 à mi-2009, cette mesure était effectuée uniquement avec le disque de Secchi historique de l'INRAE non-normalisé (disque blanc d'un diamètre de 30 cm). Depuis mi-2019, seul le disque de Secchi normalisé (disque noir et blanc, 20 cm) est employé.

3. METEOROLOGIE : INFLUENCE SUR LA STRATIFICATION ET LE MELANGE DES EAUX

3.1 TEMPERATURE DE L'AIR

L'année 2020 est l'année la plus chaude enregistrée en France avec une température moyenne annuelle de 14 °C, devant 2018 (13.9 °C). Les données de température de 4 stations (Genève, Changins, Pully et Thonon) ont classé l'année 2020 la plus chaude au même titre que l'année 2018 avec une température moyenne de l'air inter-stations de 12.3°C. Cette température moyenne est supérieure de 1.5°C à la normale de la période 1981-2010.

En 2020, les températures moyennes de l'air sont supérieures à la normale 1981-2010 sur l'ensemble de l'année, excepté pour les mois d'avril et d'octobre (Annexe V).

3.2 TEMPERATURE DE L'EAU

Les températures moyennes mesurées dans les 10 premiers mètres montrent que cette couche d'eau en 2020 est plus chaude qu'en 2019, excepté pour les mois d'octobre et de décembre. Les écarts les plus grands sont observés pour les mois de mai, juin, juillet et septembre avec les différences de températures respectives de 3.5°C, 2.0°C, 3.4°C et 3.2°C (Figure 2). Le suivi mensuel n'a pas eu lieu pour les mois de mars et d'avril, mais étant donné les valeurs élevées des températures de l'air, il est probable que les températures de l'eau aient également été plus élevées qu'en 2019 à cette période de l'année.

La température de la couche 0-10 m est supérieure au 75^e percentile des températures mesurées sur la période 1973-2019 pour tous les mois de l'année, excepté pour le mois d'octobre. En 2020, la température de la couche 0-10 m se situe au 25^e percentile de la période 1973-2018 (Figure 3)

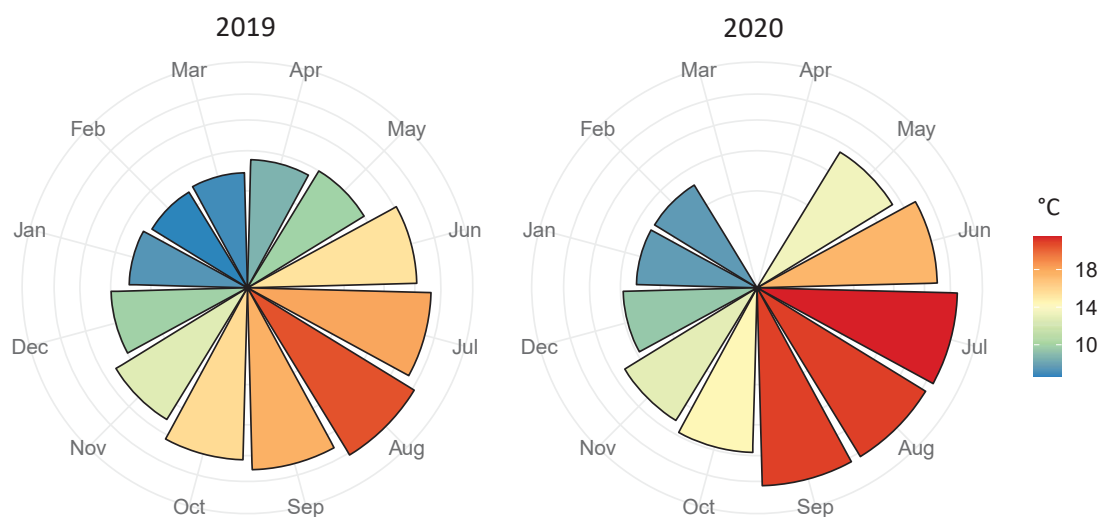


Figure 2 : Température moyenne mensuelle dans la couche (0-10 m) en 2019 et 2020, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 2 : Monthly average temperature in water layer (0-10 m) in 2019 and 2020, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

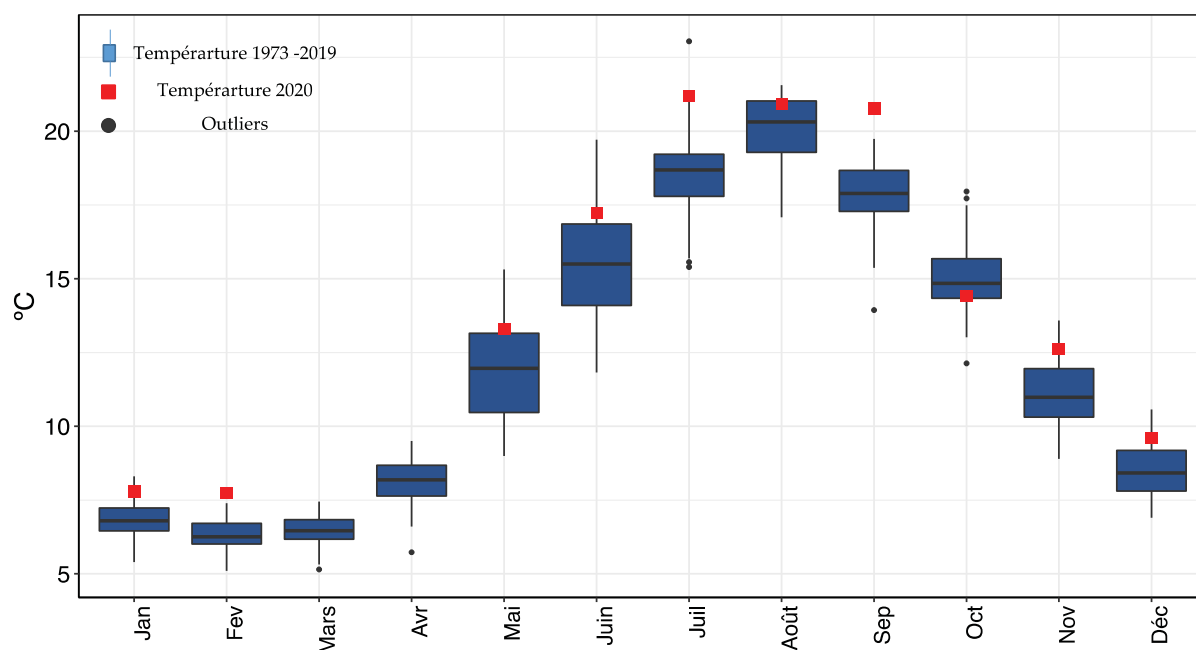


Figure 3 : Température moyenne mensuelle de l'eau de la couche (0-10m du 1973-2019 (boxplot) et en 2020 (carré rouge) – Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 3 : Monthly average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 – 2019 (boxplot) and in 2020 (red square), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

Faute de données de suivi pour les mois de mars et d'avril 2020, il n'est pas possible de confirmer si le brassage hivernal complet a eu lieu cette année 2020. Néanmoins, étant donné que l'année 2020 est l'année la plus chaude avec les mois de mars et d'avril particulièrement bien ensoleillés, ces conditions météorologiques suggèrent une faible possibilité pour un brassage hivernal complet.

En 2020, la profondeur du brassage hivernal partiel est observée à 120 m à la date du 24 février 2020 (Figure 4a). Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 5.9°C le 22 janvier 2020 soit 0.1°C et 0.2°C de plus qu'en 2019 et 2018. Ce brassage partiel n'a pas été suffisant pour réoxygéner l'eau des couches profondes du lac. La concentration en oxygène dissous mesurée au fond du lac est de 3.32 mgO₂/L lors du brassage (Figure 4a).

Au mois d'avril en 2020, la température moyenne de l'air inter-stations est de 13.0 °C, soit 3.2°C de plus par rapport à la normale de la période 1981-2010. Nous ne disposons pas de données *in-situ* pour confirmer mais de telles conditions météorologiques laissent à supposer un réchauffement des couches superficielles dès le mois d'avril avec la mise en place d'une stratification thermique qui entraîne la reprise de l'activité phytoplanctonique (Figure 4b, Figure 5). D'après les mesures *in-situ* de la sonde multi-paramètre, la concentration en chlorophylle-a est de 17.50 µgChl a/L à 26.9 m au 05 mai 2020, qui correspond à une concentration en oxygène dissous à 11.98 mgO₂/L soit 104 % en saturation d'oxygène. Ces pics d'oxygène dissous correspondent à une activité phytoplanctonique importante durant la phase printanière (mai 2020) et fin d'été (août 2020) (Rimet, ce rapport).

La stratification estivale maximale est observée le 20 août 2020 avec une température moyenne de 20.3°C sur 0-10 m (Figure 4c, Figure 5). La déstratification thermique automnale de la masse d'eau se met en place dès le 13 octobre 2020 (Figure 4d, Figure 5).

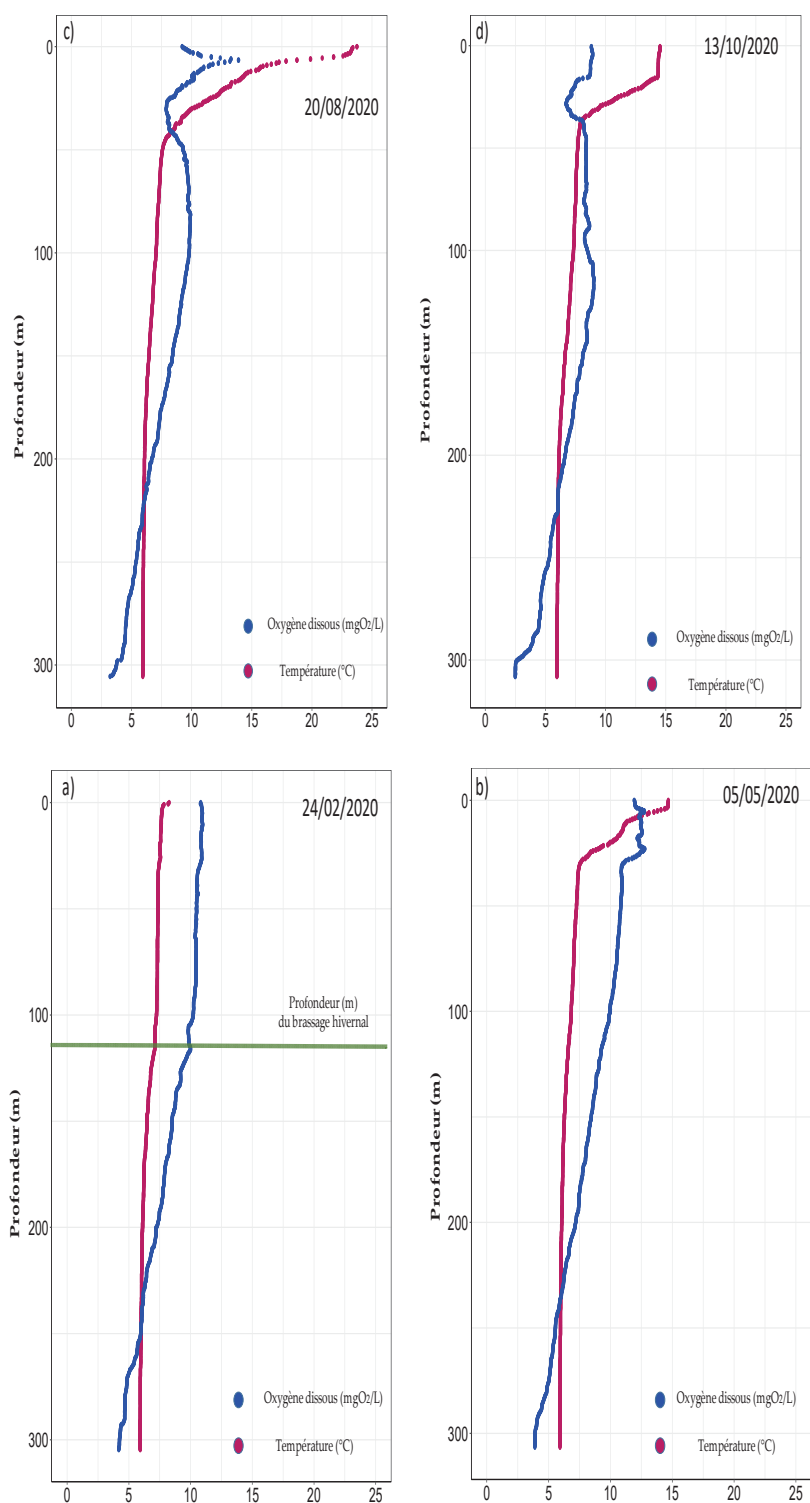


Figure 4 : Profil physico-chimique réalisé à l'aide de sondes multi-paramètres, Léman - Grand Lac (SHL2):
 a) en hiver lors du brassage partiel maximal observable (24.02.2020),
 b) au printemps (05.05.2020),
 c) en été (20.08.2020),
 d) en automne (13.10.2020).

Figure 4 : Physico-chemical profile made with multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2):
 a) in winter after maximal observable water mixing (24.02.2020),
 b) in spring (05.05.2020),
 c) in summer (20.08.2020),
 d) in autumn (13.10.2020).

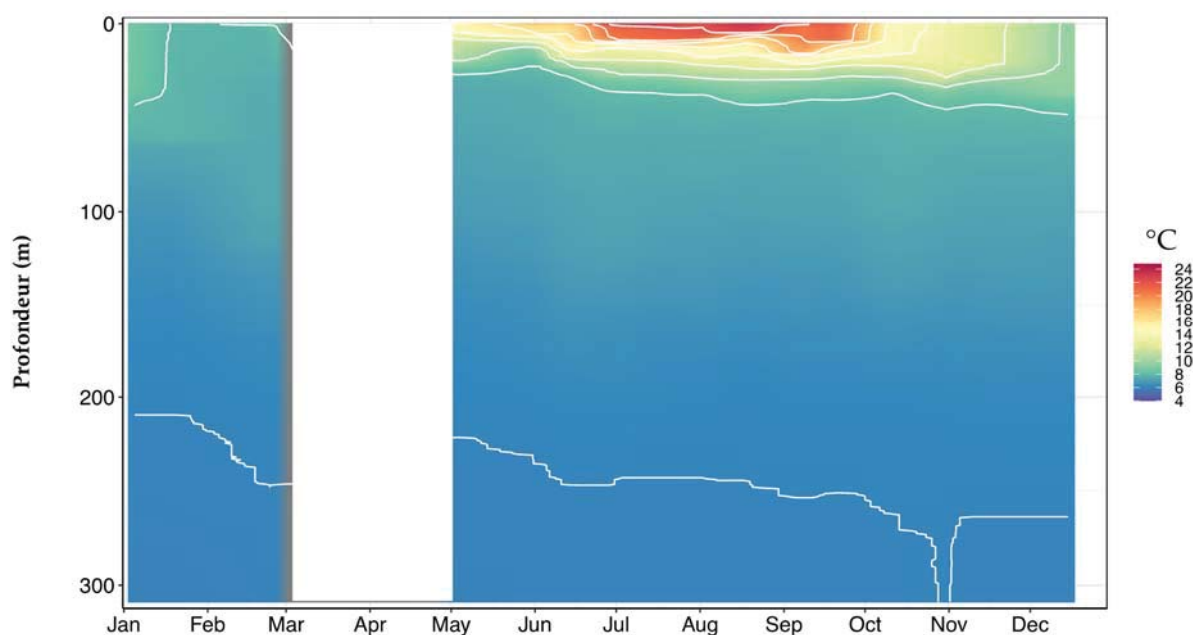


Figure 5 : Température des eaux du lac en 2020 (iso-contour en blanc), Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 5 : Water temperature in the lake in 2020 (iso-contour lines in white), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

3.3 VARIATION INTERANNUELLE DE LA TEMPERATURE 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 les couches profondes, la température de l'eau passe de 5.12 °C en 2012 à 5.93 °C en 2020, soit une augmentation de 0.81°C en 8 ans. Ce réchauffement est plus rapide que le réchauffement moyen observé sur la période pré-2000 pour les lacs européens, soit un réchauffement de 0.10°C par décennie (Dokulil et al. 2006). L'absence de brassage hivernal complet explique l'augmentation de la température observée ces dernières années (Figure 6).

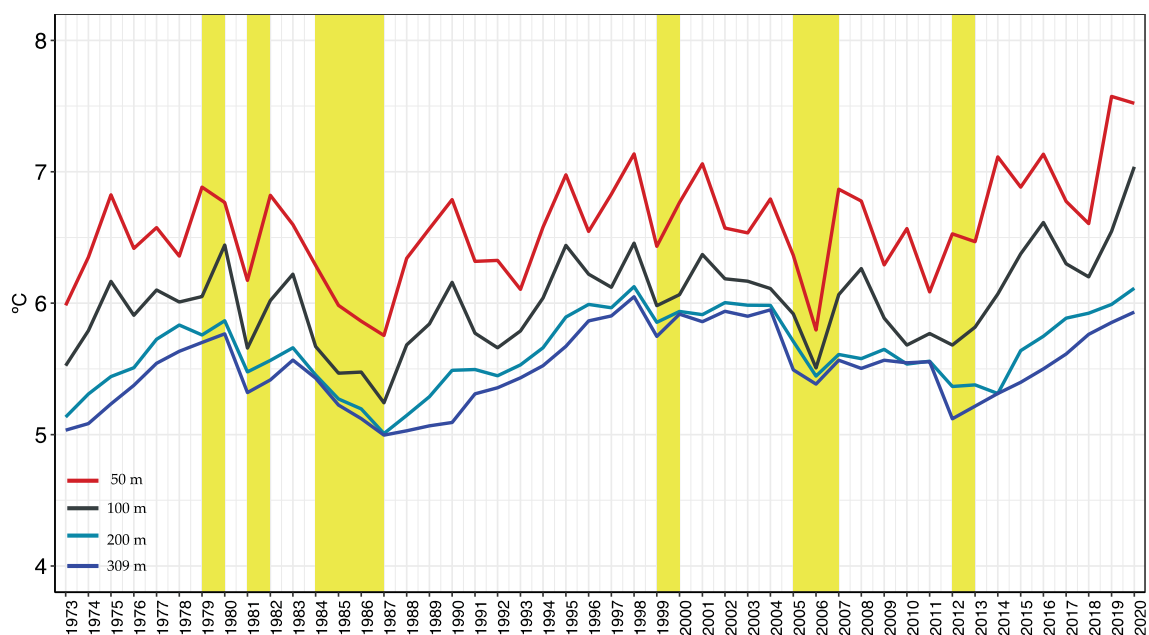


Figure 6 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1973 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

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 2020, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete turnover during winter.

La température moyenne annuelle dans la couche 0-10 m montre une tendance au réchauffement statistiquement significative depuis 1973 ($p\text{-value} < 0.005$) (Figure 7). En 2020, la température de cette couche est de 13.9 °C, soit une augmentation de 1.5°C par rapport à l'année 2019. Cette valeur en 2020 est la valeur la plus élevée de toute la série temporelle.

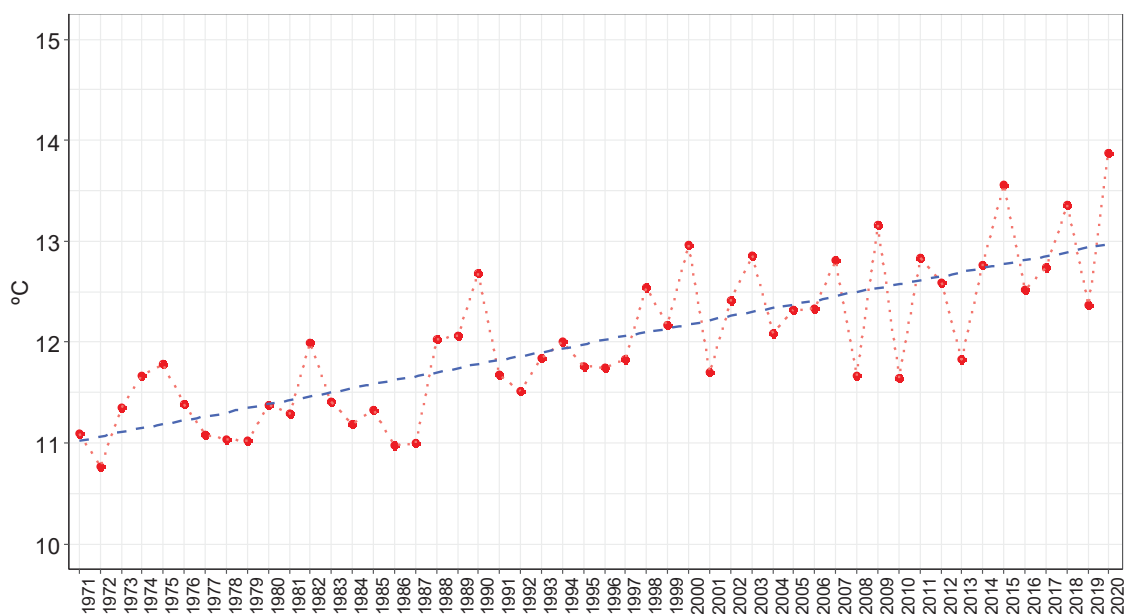


Figure 7 : Evolution de la température moyenne annuelle de l'eau de la couche 0-10m de 1973 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 7 : Inter-annual changes in the annual average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 to 2020, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4. PROXY D'ACTIVITE PHYTOPLANCTONIQUE

4.1 TRANSPARENCE DE L'EAU

La dynamique de transparence pour l'année 2020 est représentée sur la figure 8. L'hiver 2020 entraîne une transparence importante jusqu'à 15.0 m le 20 janvier 2020.

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 5.9 m le 02 juin 2020. Après cette date, la transparence augmente en raison de la baisse de l'abondance de la communauté phytoplanctonique alors fortement broutée par le zooplancton. La phase des eaux claires est observée le 30 juin 2020. La transparence diminuera de nouveau par la suite. Enfin, sur la dernière partie de l'année, la transparence augmente progressivement et atteint 7.8 m le 16 décembre 2020 (Figure 8).

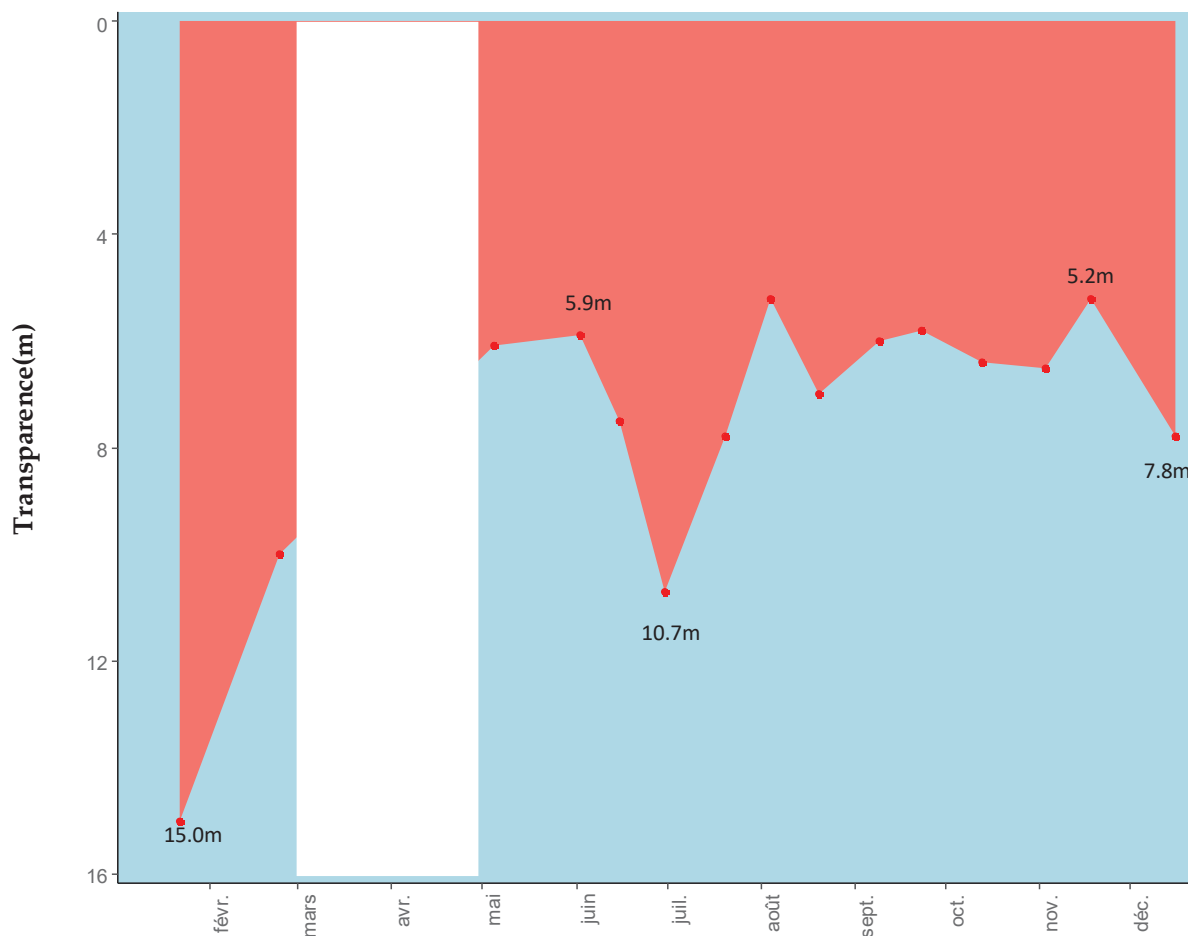


Figure 8 : Transparence avec le disque de Secchi, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 8 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 120 m, le pH de la colonne d'eau oscille entre 7.5 et 8.1 tel que l'on peut l'observer sur le profil du 24 février 2020 (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 la photosynthèse. Le CO₂ étant consommé, l'équilibre acido-basique du milieu est modifié et le pH augmente. Lors du pic phytoplanctonique le 05 mai 2020, le pH moyen mesuré dans la couche 0-30 m est de 8.5, soit 0.5 unité supérieure à la valeur du pH

à l'issue du brassage hivernal 2020. Le pH diminue continuellement et varie légèrement entre 8.2 et 7.9 par la suite, durant la période printanière et estivale. En fonction de l'activité photosynthétique, le pH augmente de nouveau et atteint une valeur de 8.3 le 09 septembre 2020, ce qui correspond au deuxième pic du phytoplancton (RIMET et al, ce rapport). Au mois de décembre 2020, le pH diminue progressivement dans toute la colonne d'eau en raison de la déstratification de la masse d'eau et de la diminution de l'activité phytoplanctonique.

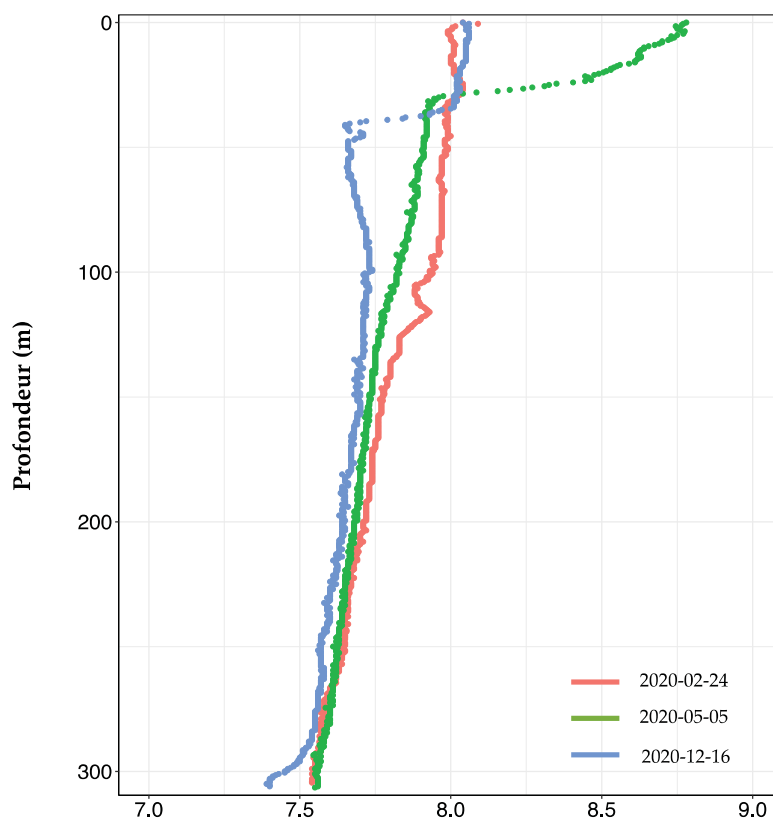


Figure 9 : pH des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal observable de la colonne d'eau (24/02/2020), de la reprise d'une activité photosynthétique significative et du pic phytoplanctonique (05/05/2020) et à l'issue de la déstratification de la colonne d'eau (16/12/2020), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 9 : pH in the lake as a function of depth after maximal observable water mixing (24/02/2020), during recovery of significant photosynthetic activity and during phytoplankton peak (05/05/2020) and after water column destratification (16/12/2020), 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. La production d'oxygène par la photosynthèse dans les couches superficielles est observable au mois de mai 2020. Cette activité phytoplanctonique printanière engendre une sursaturation en oxygène à la surface qui atteint une valeur moyenne de 12.68 mgO₂/L le 05/05/2020.

La concentration en oxygène dissous dans les couches superficielles poursuit son augmentation pour atteindre la valeur moyenne maximale de 11.75 mgO₂/L le 05 mai 2020. 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 9.55 mgO₂/L le 20 août 2020. Ce phénomène peut aussi s'expliquer par la diffusion d'oxygène vers les couches d'eau inférieures 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 désoxygénation de l'épilimnion induite par le transfert d'oxygène vers les couches plus profondes est observée avec un minimum à 28 m au mois d'octobre égal à 6.45 mgO₂/L en 2020 contre 6.36 mgO₂/L en 2019.

En 2020, le brassage hivernal n'a pas permis de redistribuer l'oxygène dissous dans l'ensemble de la colonne d'eau. A l'issue de ce brassage, le 24 février 2020, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est égale à 3.32 mgO₂/L. Cette concentration est inférieure à 4 mgO₂/L qui est la valeur minimum 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 2020.

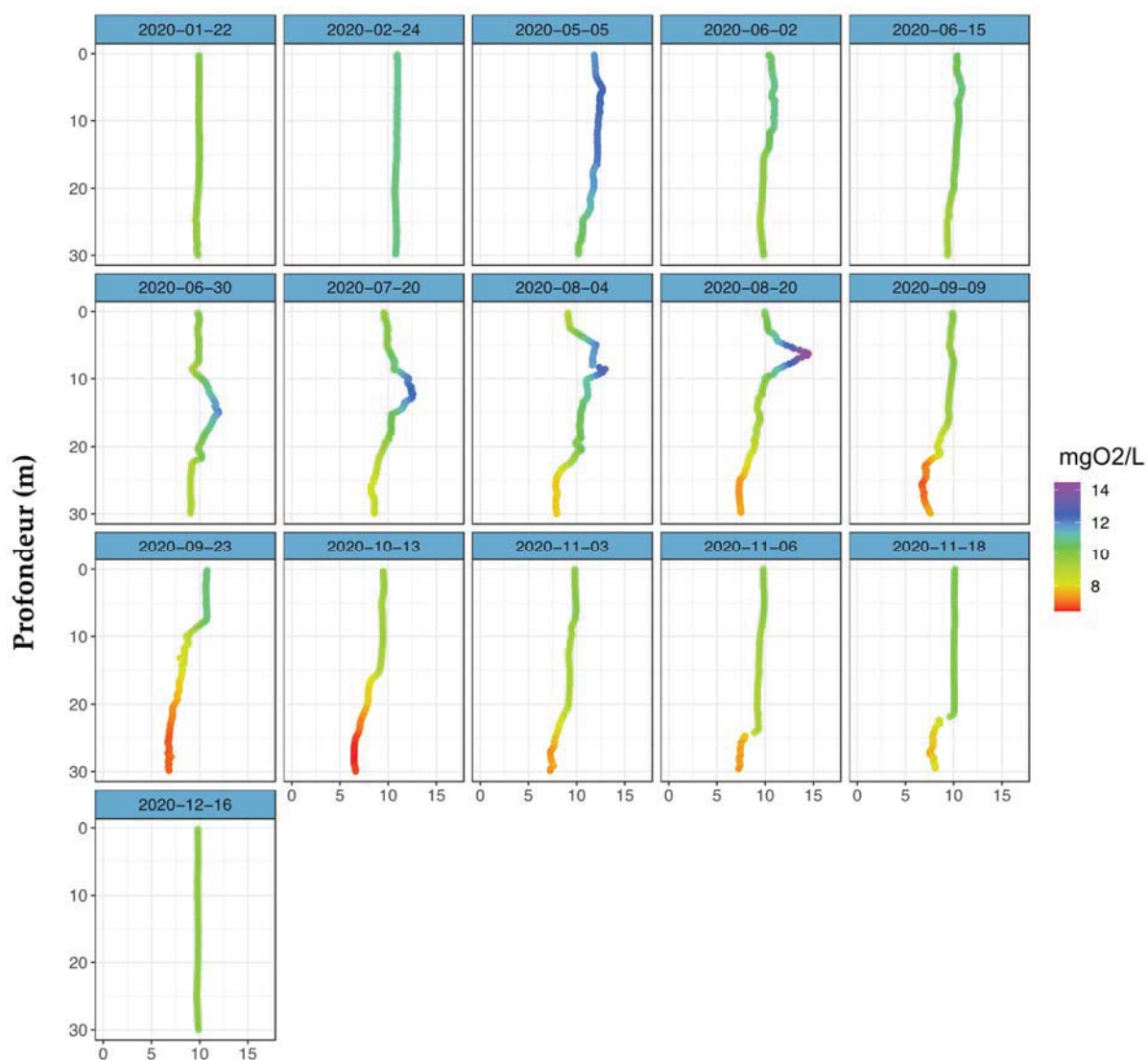
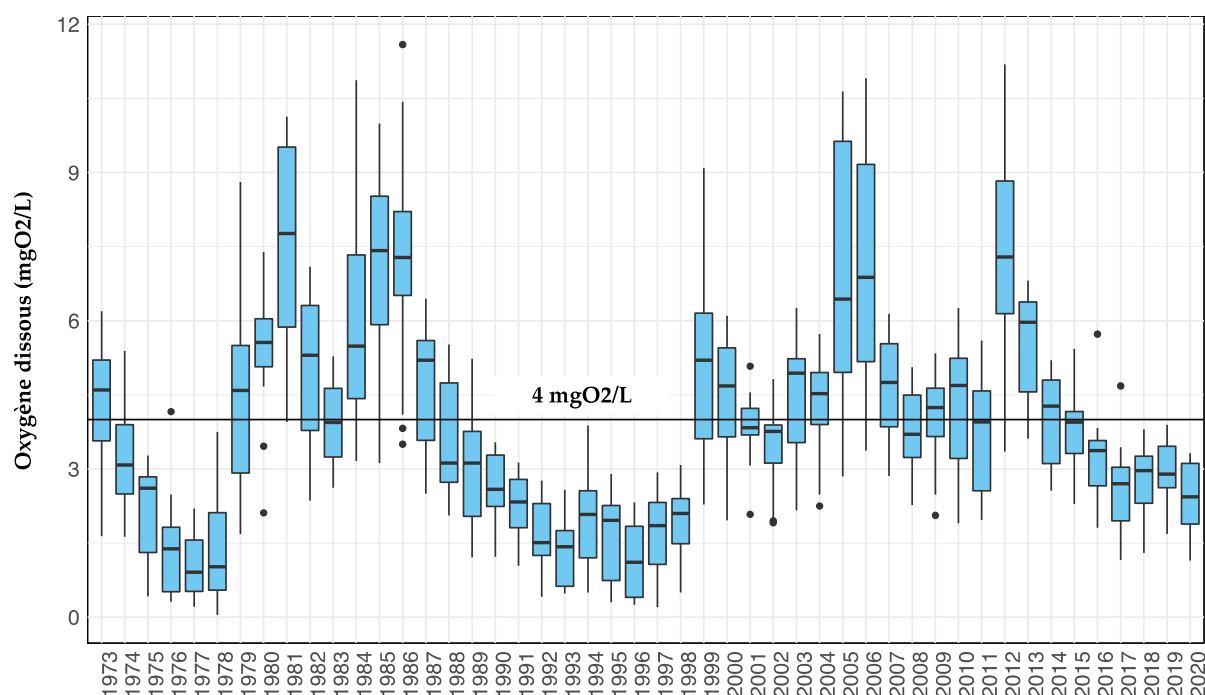


Figure 10 : Concentration en oxygène dissous entre 0 et 30 m de la colonne d'eau du lac, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 mgO₂·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 4mgO₂·L⁻¹ depuis 2016.



* Mesure de la concentration en oxygène dissous effectuée en laboratoire selon la méthode de Winkler à des profondeurs définies

Figure 11 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux à 309 m de 1972 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 11 : Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2020, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La désoxygénation des couches profondes entraîne plusieurs phénomènes propres à ces conditions réductrices : 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 engendrent indirectement la remise en suspension des sédiments, visible avec l'augmentation de la turbidité, et libèrent ainsi la silice présente dans les eaux interstitielles et les sédiments.

4.4 MATIÈRE PARTICULAIRE

La matière particulaire dans les couches d'eau superficielles 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, les concentrations en carbone organique particulaire (COP) dans les couches superficielles évoluent inversement à la teneur en nutriments dissous dans l'eau et ceci dès le début de l'activité phytoplanctonique.

Ainsi, le pic printanier de carbone organique particulaire est observé le 05 mai 2020 avec une valeur maximale de 439 $\mu\text{gC/L}$ à 10 m (Figure 12). Le deuxième pic plus marqué de carbone organique particulaire est observé au mois de septembre avec une valeur de 479 $\mu\text{gC/L}$. Pour l'année 2020, les deux pics de carbone organique particulaire observés correspondent aux périodes où la biomasse phytoplanctonique est importante (RIMET, ce rapport).

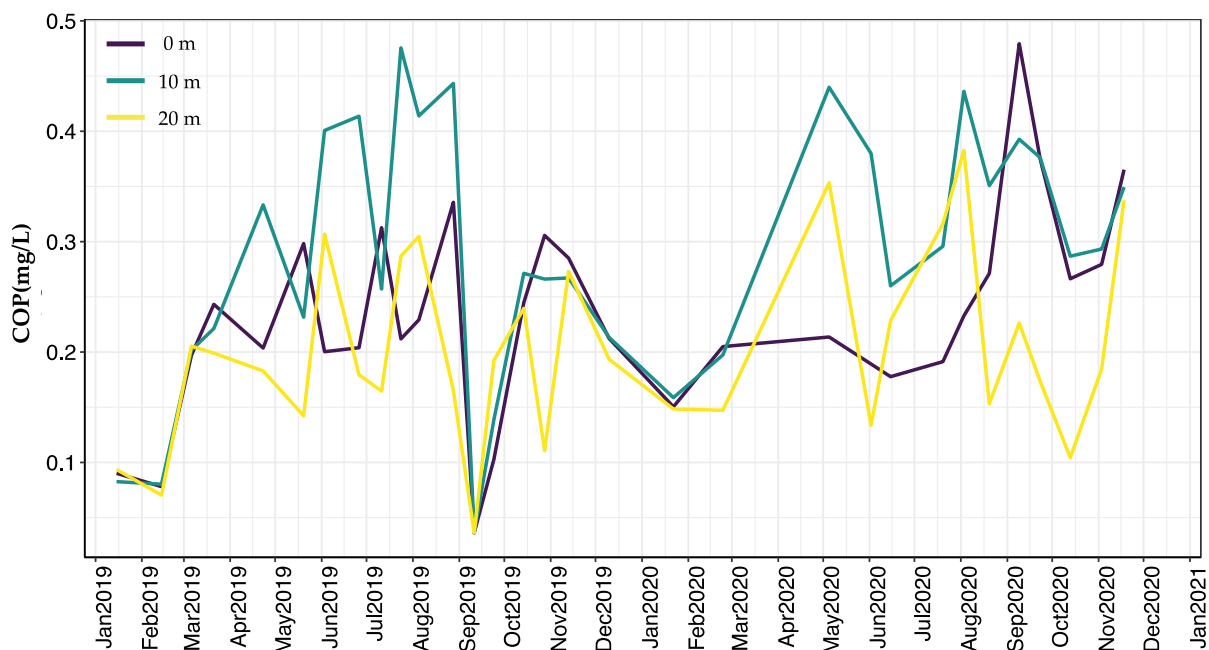


Figure 12 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches de 0, 10 et 20 m, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 de montrer une diminution au cours de cette série temporelle depuis l'année 1986.

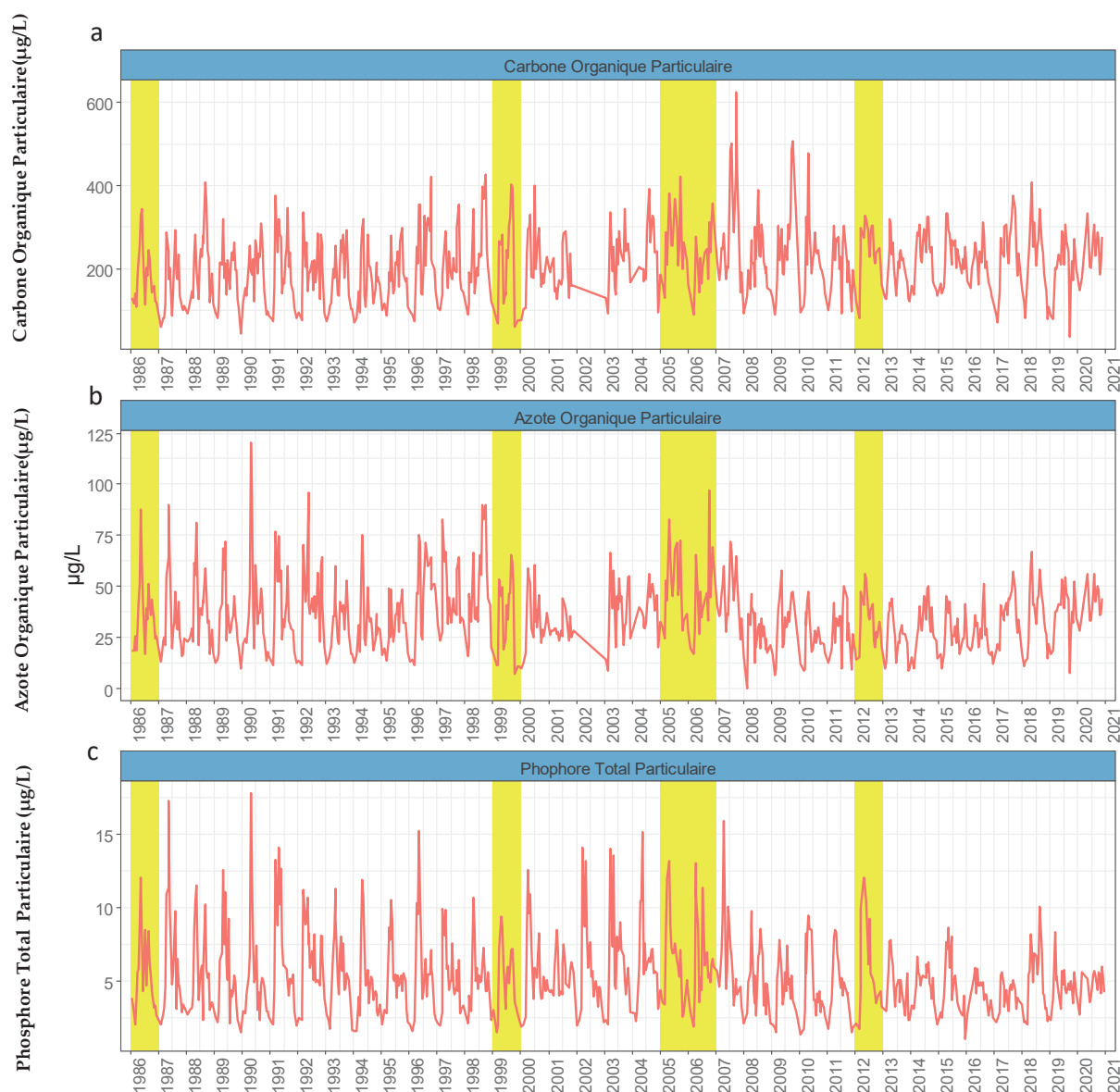


Figure 13 : Evolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche 0 - 20 m de 1986 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2) :

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

Figure 13 : Change in the concentration of particulate matter in the 0 - 20 m layer from 1986 to 2020, 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 2020 qui traduit une carence en phosphore quand ce rapport est supérieur à 7, en en se référant à la stœchiométrie de la réaction globale de la photosynthèse. L'année 2020 indique une carence en phosphore. Elle est plus importante que pendant l'année 2019.

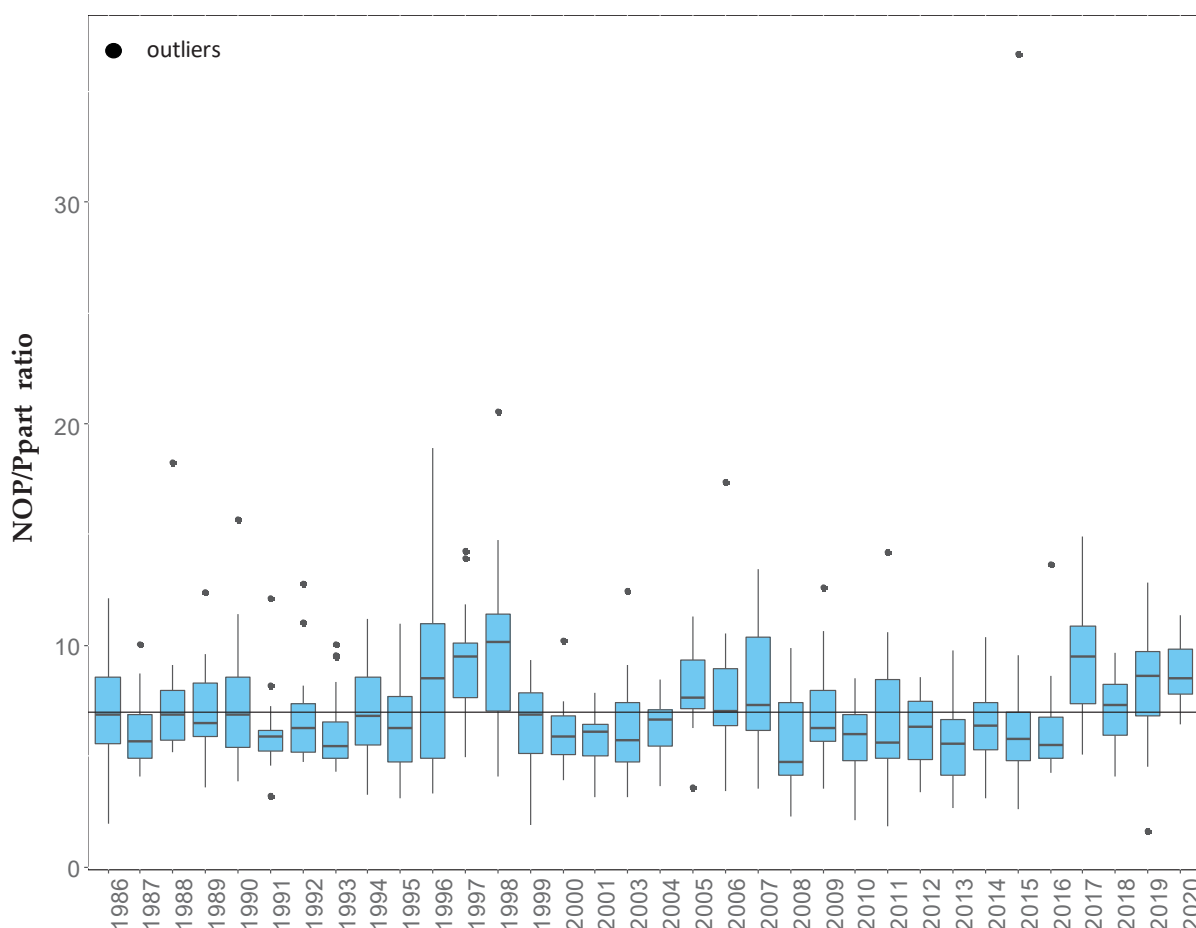


Figure 14 : Evolution du rapport Azote organique particulaire/ Ppart dans l'eau de la couche (0 - 20 m de 1986 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2))

Figure 14 : Change in NOP / Ppart ratio in the 0-20m layer from 1986 to 2020, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5. ELEMENTS NUTRITIFS

5.1 PHOSPHORE TOTAL ET ORTHOPHOSPHATE

Un brassage hivernal des eaux d'un lac permet de remettre à disposition les nutriments dans la colonne d'eau à partir des couches inférieures plus concentrées et de réoxygéner les eaux du fond. Or, l'hiver 2020 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 14 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 2020. 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 orthophosphate de $3.5 \mu gP/L$ dans la couche 0-30 m en 2020.

Dans les couches profondes (250-309 m), la concentration en orthophosphate montre 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 orthophosphate mesurée dans les couches profondes. Depuis 2018, la concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphate présente une légère baisse. En 2020, elle était de $34.5 \mu gP/L$. 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.

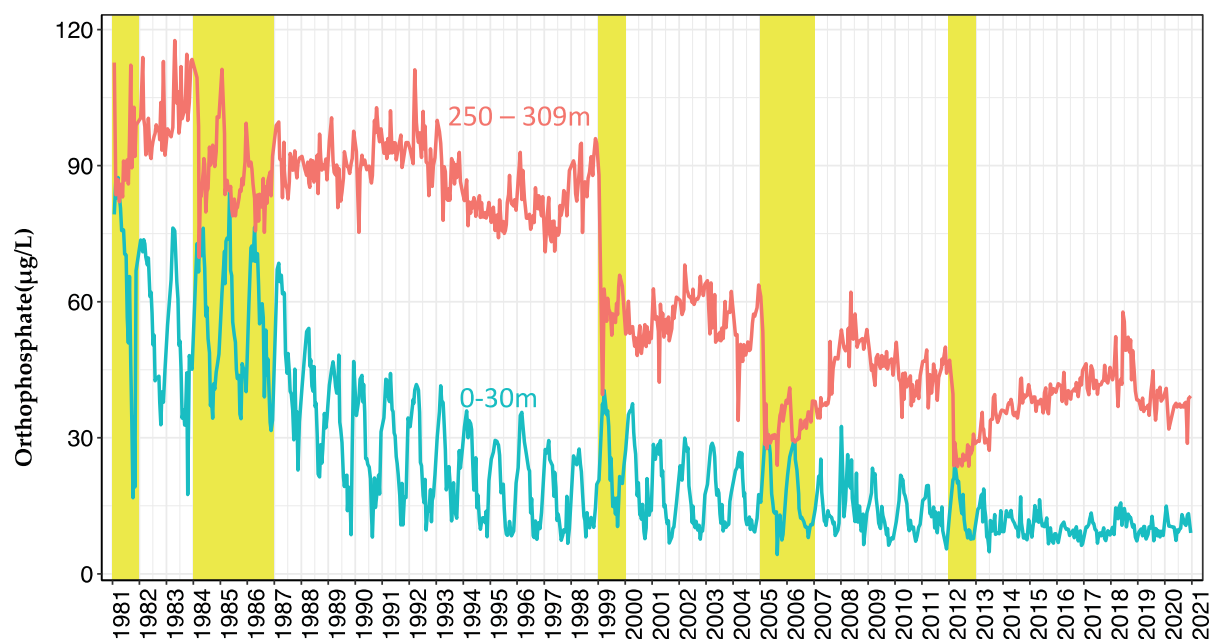


Figure 15 : Concentration moyenne pondérée en orthophosphate ($P-PO_4^{3-}$) dans la couche 0 - 30 m et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2020. Les barres en jaune représentent les brassages complets

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 2020. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

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 2020.

La même observation que pour les orthophosphates est faite pour la concentration en phosphore total, à savoir la concentration en phosphore total diminue progressivement dans les 30 premiers mètres et diminue nettement au fond après chaque brassage complet avec une dynamique en 3 temps comme décrite précédemment. La concentration annuelle moyenne pondérée en phosphore total 0-30 m en 2020 est de 10.93 $\mu gP/L$. La concentration en phosphore totale dans les couches profondes est de 36.75 $\mu gP/L$.

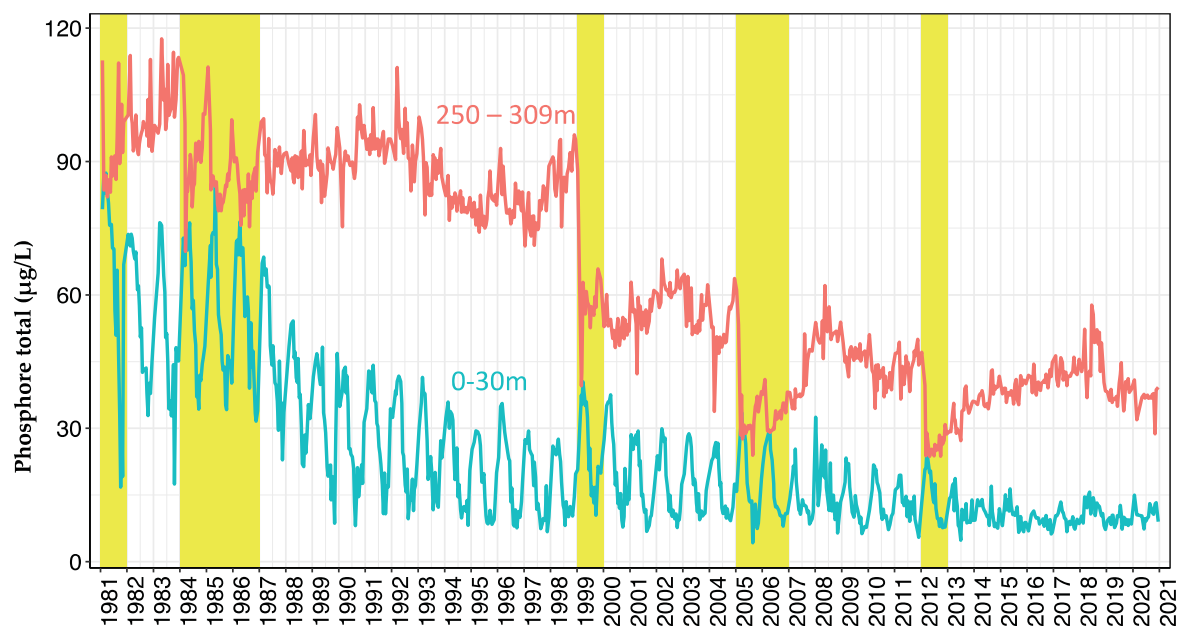


Figure 16 : Concentration moyenne pondérée en phosphore total (P-Ptot) dans la couche 0 - 30 m et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2020. Les barres en jaune représentent les brassages complets

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 2020. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

En 2020, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total sur l'ensemble du grand lac est de 16.92 µgP/L, soit une légère augmentation de 0.72 µgP/L par rapport à l'année 2019 (Figure 17). Néanmoins, le phosphore total reste proche de l'objectif de la CIPEL pour l'année 2020 qui fixe une concentration en phosphore total entre 10 et 15 µgP/L.

La concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphate est de 13.05 µgP/L en 2020, soit une augmentation de 1.14 µgP/L par rapport à l'année 2019.

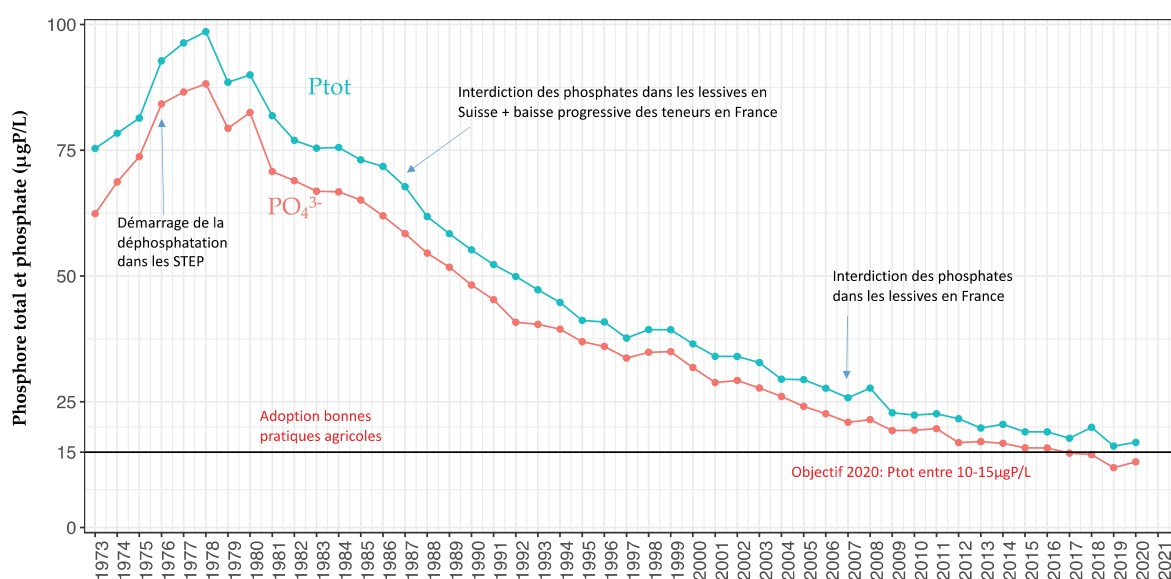


Figure 17 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée des orthophosphates et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 17 : Change in weighted mean annual total concentration and stock of orthophosphate and total phosphorus in the entire mass of lake's water from 1973 to 2020, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.2 AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMMONIACAL

A l'issu du brassage hivernal, la concentration moyenne, mesurée sur les 30 premiers mètres, en azote nitrique est de 544 $\mu\text{gN/L}$, contre la concentration mesurée en 2019 de 564 $\mu\text{gN/L}$ (Figure 20). Elle atteint un maximum de 550 $\mu\text{gN/L}$ le 24 février 2020, soit du même ordre de grandeur par rapport à l'année 2019. La concentration en azote nitrique des couches de 0 à 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 147 $\mu\text{gN/L}$ le 23 septembre 2020 lors du deuxième pic du phytoplancton. La consommation ralentit dès le mois d'octobre et les concentrations mesurées commencent à augmenter pour atteindre une concentration moyenne, sur les 30 premiers mètres, de 442 $\mu\text{gN/L}$ en décembre 2020.



Figure 18 : Concentration en azote nitrique (N-NO_3^-) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 18 : Concentration of nitrate (N-NO_3^-) in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

En 2020, la concentration moyenne en azote total reste stable à 672 $\mu\text{gN/L}$ par rapport à l'année 2019 avec 667 $\mu\text{gN/L}$. La concentration moyenne annuelle en nitrates en 2020 est de 541 $\mu\text{gN/L}$ et reste également similaire à celle de 2019 (Figure 19). Les concentrations en nitrate dans les eaux du Léman restent conforme à la norme d'eau de consommation en Suisse qui édicte une valeur de tolérance de 40 mgNO_3^-/L et en France, une limite de qualité qui est de 50 mgNO_3^-/L .

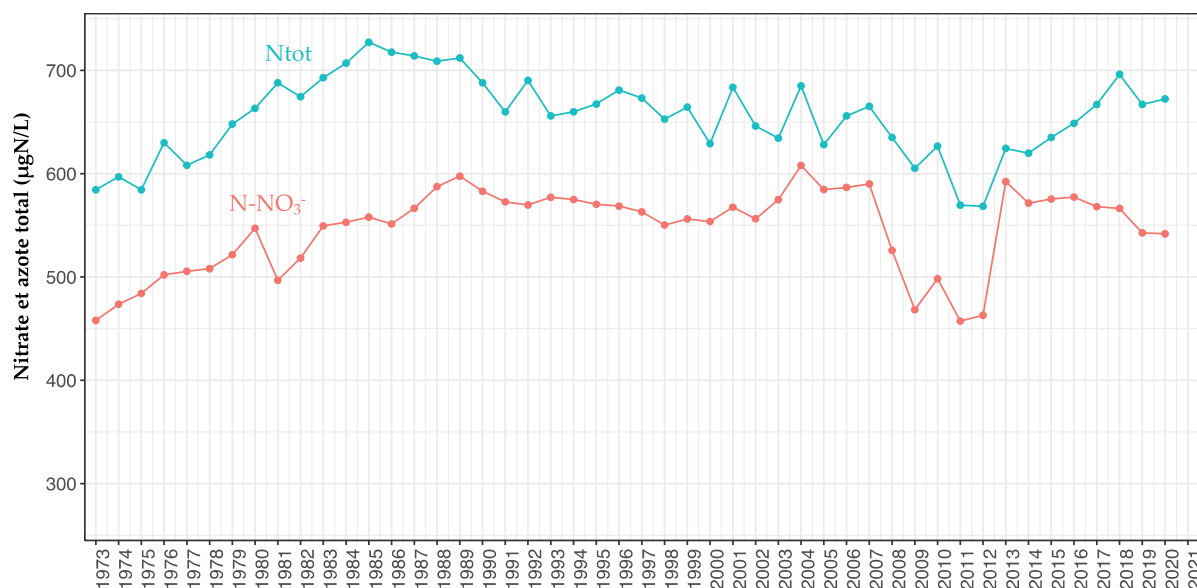


Figure 19 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2)

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 2020, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

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). En 2020, la valeur maximale était de 34.52 µgN/L à 15 m le 20 juillet 2020 (Figure 20). Ceci est à corréler avec une activité zooplanctonique importante liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période (RIMET, ce rapport)

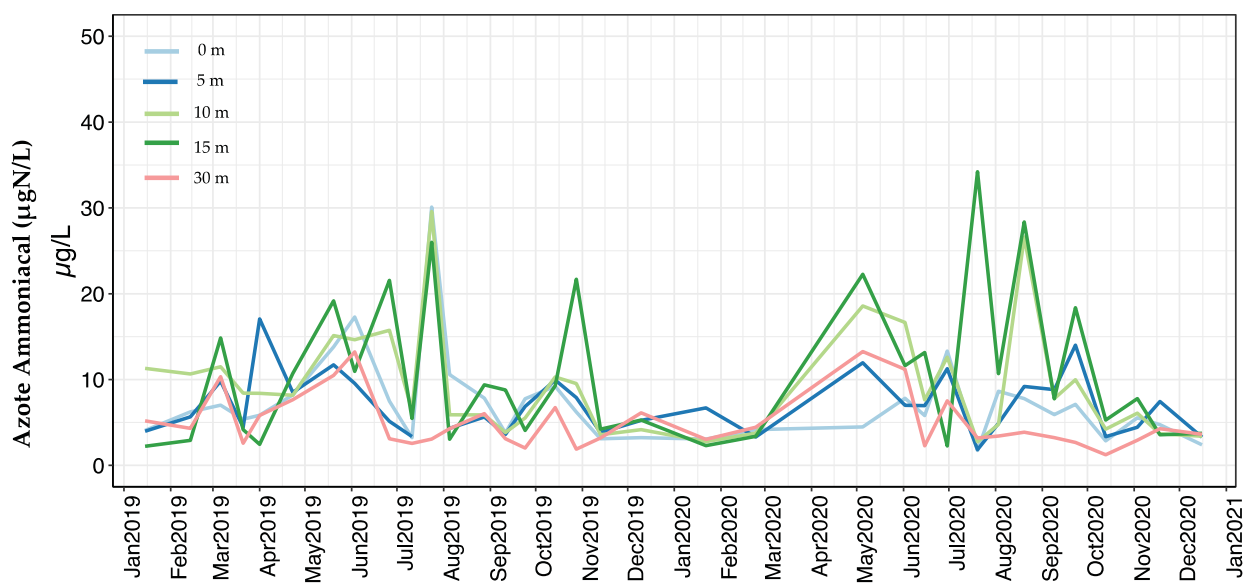


Figure 20 : Concentration en azote ammoniacal (N-NH₄⁺) dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 20 : Concentration of ammoniacal nitrogen in lake's 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 les couches d'eau superficielles entre 0 et 30 m, la plus forte concentration en silice est de 1.07 mgSiO₂/L à l'issue du brassage hivernal le 20 février 2020. La concentration moyenne annuelle en 2019 est de 0.48 mgSiO₂/L, soit inférieure de 0.11 mgSiO₂/L par rapport à l'année 2019. La concentration en silice diminue progressivement au cours des mois pour atteindre une valeur de 0.58 mgSiO₂/L au début de l'été le 02 juin 2020. La concentration minimale de 0.30 mgSiO₂/L est atteinte le 15 juin 2020. Les concentrations en silice demeurent faibles entre juin et octobre 2020. 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. Néanmoins, une chute importante de la silice à 0.19 mgSiO₂/L a été observé à la suite d'un pic tardif des diatomées le 18 novembre 2020 (RIMET ce rapport) (Figure 21)

Depuis les derniers brassages complets en 2005, 2006 et 2012, la silice dans les couches d'eau profondes n'est pas redistribuée dans l'ensemble de la colonne d'eau (Figure 21). La concentration en silice diminue nettement dans les couches profondes après chaque brassage complet.

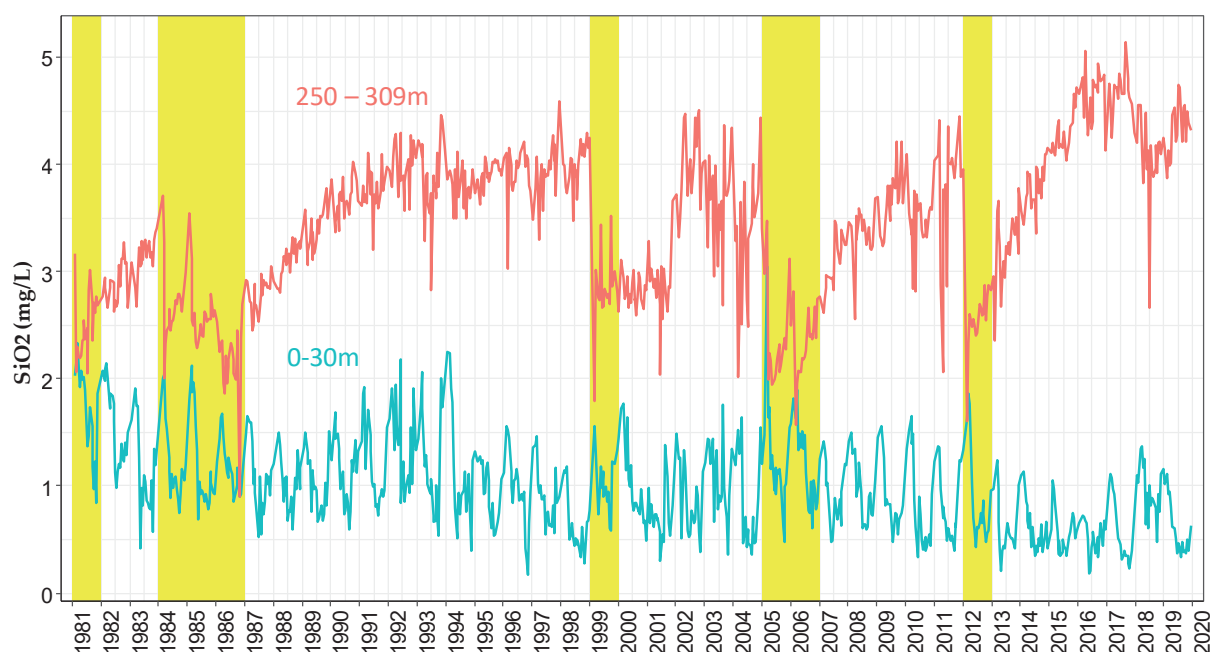


Figure 21 : Concentration moyenne pondérée en silice (SiO₂) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 – 309 m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2020. Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 21 : Concentration of silica (SiO₂) in the 0-30m layer and bottom layer (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2020. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

6. AUTRES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

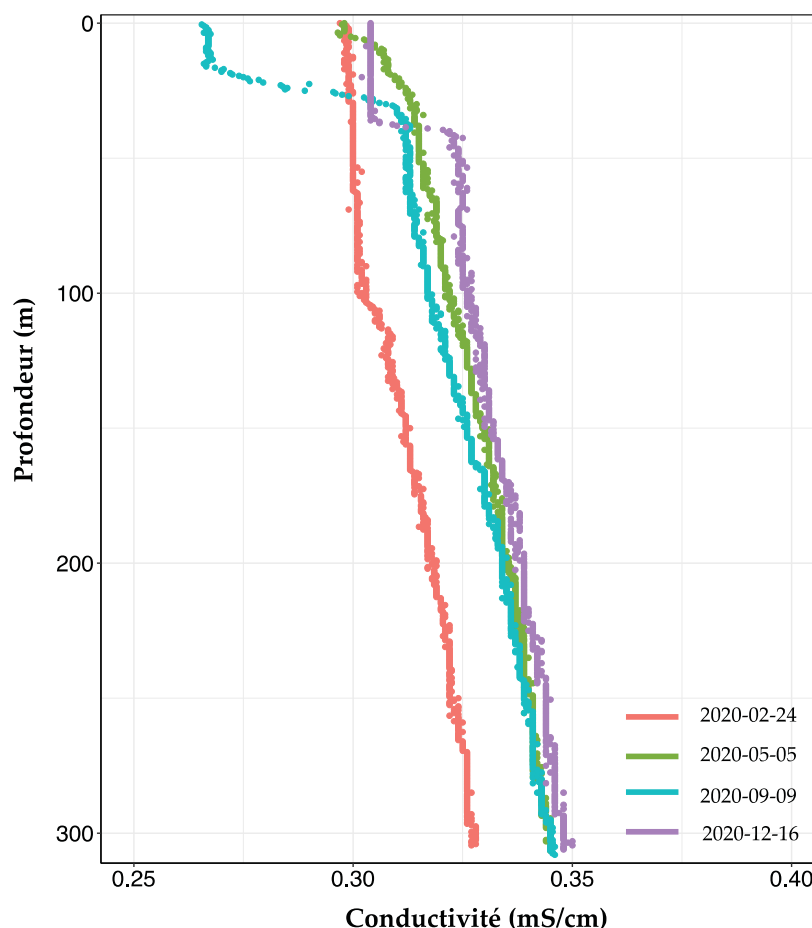
6.1. CONDUCTIVITÉ

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, la conductivité n'est pas homogène dans la colonne d'eau et varie entre 297 et 328 µS/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 les couches d'eau superficielles qui débute dès le printemps et la diminution nette de la conductivité en été. La conductivité minimale dans l'épilimnion est observée le 09 septembre 2020 avec des valeurs aux alentours de 263 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de 0 à 30 m tel que cela est représenté en vert 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.



* Mesure de la conductivité à 25°C est effectuée en laboratoire à des profondeurs définies

Figure 22 : Conductivité des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal observable de la colonne d'eau (24/02/2020), lors du démarrage significatif de la précipitation du carbonate de calcium (05/05/2020), lors de sédimentation maximale du carbonate de calcium (09/09/2020) et lors de l'enfoncement maximal de la thermocline (16/12/2020), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 22 : Conductivity in the lake as a function of depth after maximal observable water mixing (24/02/2020), during the beginning of significant calcium carbonate precipitation (05/05/2020), during maximal calcium carbonate sedimentation (09/09/2020) and after thermocline deepening (16/12/2020), 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 les couches d'eau superficielles 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 1.50 et 1.72 meq/L en 2020. Il atteint une valeur maximale dans la colonne d'eau à 1.72 meq/L le 02 juin 2020 pendant 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 1.50 meq/L. Finalement, le TAC augmente à nouveau dans les couches d'eau de surface à partir du mois d'octobre 2020 (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 2020. Dans les premiers mètres qui hébergent l'activité photosynthétique, la variabilité saisonnière du TAC est plus importante que dans les couches profondes 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 les couches profondes, l'amplitude de la variation saisonnière du TAC est faible. Il reflète une tendance à l'augmentation avec un plateau depuis 2018.

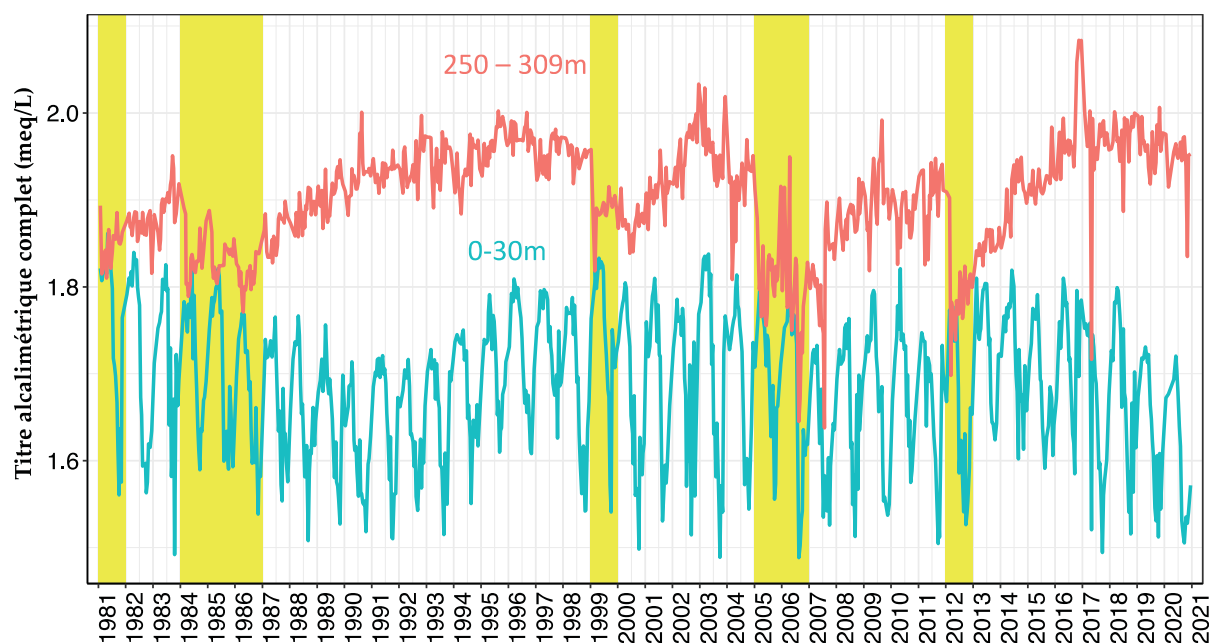


Figure 23 : Titre alcalimétrique complet moyen pondéré dans la couche 0-30 m et la couche profonde (250-309 m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2020. Les barres en jaune représentent les brassages complets.

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 2020. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

6.3. CHLORURE

La concentration des ions chlorures dans le Léman était en constante augmentation de 1973 à 2016 et semble s'être stabilisée depuis (figure 24). En 2020, le stock de chlorure est égal à 886 212 tonnes, soit une moyenne annuelle pondérée qui atteint 10.30 mg/L contre 903'380 tonnes et 10.50 mg/L en 2019. Les apports via les affluents du Léman expliquent une majeure partie de ces teneurs (KLEIN, 2016) qui reflètent une utilisation croissante 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).

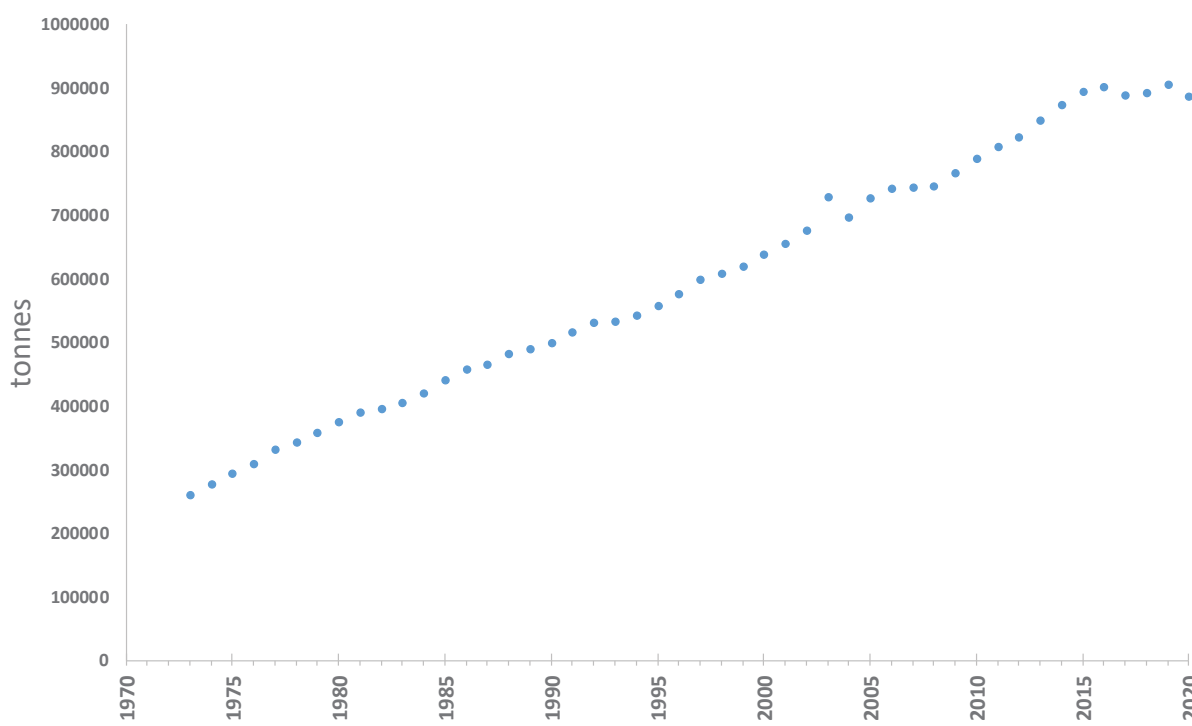


Figure 24 : Evolution du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 24 : Change in stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1973 to 2020, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

7. BIBLIOGRAPHIE

- Anneville O., Ginot V., Angeli N. (2001). Evolution 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. (2021) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2019.
- RIMET, F. (2021) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2020.
- SOERE OLA-IS, AnaEE-France, INRA Thonon-les-Bains, CIPEL [10/02/2018], developed by Eco-Informatics ORE INRA Team
- TRAN KHAC, V., QUETIN, P. et ANNEVILLE, O. (2021) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman (éléments majeurs) et données météorologiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2020.
- VARGAS, S. (2016) Analyses comparatives interlaboratoires. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2015, 217-224.

8. 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

Partie du lac	Année	Niveau (m)	Volume (km ³)	Année	Niveau (m)	Volume (km ³)	Année	Niveau (m)	Volume (km ³)
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 (km ³)	Année	Niveau (m)	Volume (km ³)	Année	Niveau (m)	Volume (km ³)
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 2020, Léman - Grand Lac (SHL2). Calcul à partir des données extraites de la SOERE SI-OLA selon les coefficients de pondérations dans l'annexe I

Tableau 3 : Mean annual weighted concentrations from 1957 to 2020, 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 mètre	mai-septembre 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

b : valeurs interpolées

ANNEXE III

Tableau 4 : Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2020, Léman - Grand Lac (SHL2)

Tableau 4 : Annual total content in metric tons from 1957 to 2020, 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

b : valeurs interpolées

ANNEXE IV

Tableau 5 : Incertitudes élargies des principales analyses physico-chimiques

Tableau 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
N _{tot}	µgN·L ⁻¹	10.9
NOP	µgN·L ⁻¹	6.0
PO ₄ ³⁻	µgP·L ⁻¹	6.2
P _{tot}	µgP·L ⁻¹	8.4
P _{part}	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**DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES****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 (calculée par Météo Suisse). Conformément aux recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui considère les moyennes sur trente ans comme étant les valeurs « Normales », les paramètres seront comparés à leurs moyennes inter-stations sur la période 1981 - 2010.

2. TEMPÉRATURE DE L'AIR

En 2020, les températures des mois de juin et octobre furent proche de la normale, le reste de l'année les températures mensuelles furent supérieures aux normales. L'écart des températures par rapport à la normale était relativement important pendant la période hivernale (janvier, février) lorsque les moyennes mensuelles étaient pratiquement le double que celles de leurs normales inter-stations (tableau 1.1, figure 1.1).

Tableau 1.1 Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2020 (°C).

Table 1.1 Monthly mean of air temperature for each station in 2020 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	3.1	3.5	4.4	4.2	2.1
Février	7.1	6.8	7.2	7.7	2.8
Mars	7.4	7.1	7.2	7.6	6.4
Avril	13	12.8	13.4	12.8	9.8
Mai	15.6	15.5	15.6	15.3	14.2
Juin	17.9	17.4	17.5	18.1	17.7
Juillet	22.2	21.6	21.8	22.1	20.2
Août	21.2	20.7	21	21.4	19.7
Septembre	17.3	17.2	17.7	17.9	15.7
Octobre	10.3	10	10.8	11.1	11.4
Novembre	6.8	6.9	7.8	7.8	6.0
Décembre	3.9	3.8	4.4	4.7	3.1
Moyenne annuelle	12.8	11.9	12.4	12.6	10.8

En 2020, la température moyenne annuelle inter-stations est de 12.3 °C, égale à celle mesurée en 2018, année la plus chaude observée depuis 1981 (tableau 1.2, figure 1.2), 2020 est la 7^{ième} année consécutive (depuis 2014) présentant une moyenne annuelle inter-stations supérieure à la normale.

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

Table 1.2 Annual mean of air temperature at the inter-stations (°C).

Années	Température moyenne annuelle	Années	Température moyenne annuelle
1981	9.9	2001	11.0
1982	10.6	2002	11.5
1983	10.4	2003	11.7
1984	9.7	2004	11.0
1985	9.4	2005	10.6
1986	10.0	2006	11.3
1987	10.1	2007	11.4
1988	10.9	2008	10.9
1989	11.0	2009	11.3
1990	11.2	2010	10.3
1991	10.4	2011	11.8
1992	10.9	2012	11.1
1993	10.4	2013	10.3
1994	11.9	2014	11.7
1995	10.9	2015	11.7
1996	10.2	2016	11.2
1997	11.1	2017	11.5
1998	11.0	2018	12.3
1999	11.0	2019	11.8
2000	11.6	2020	12.3

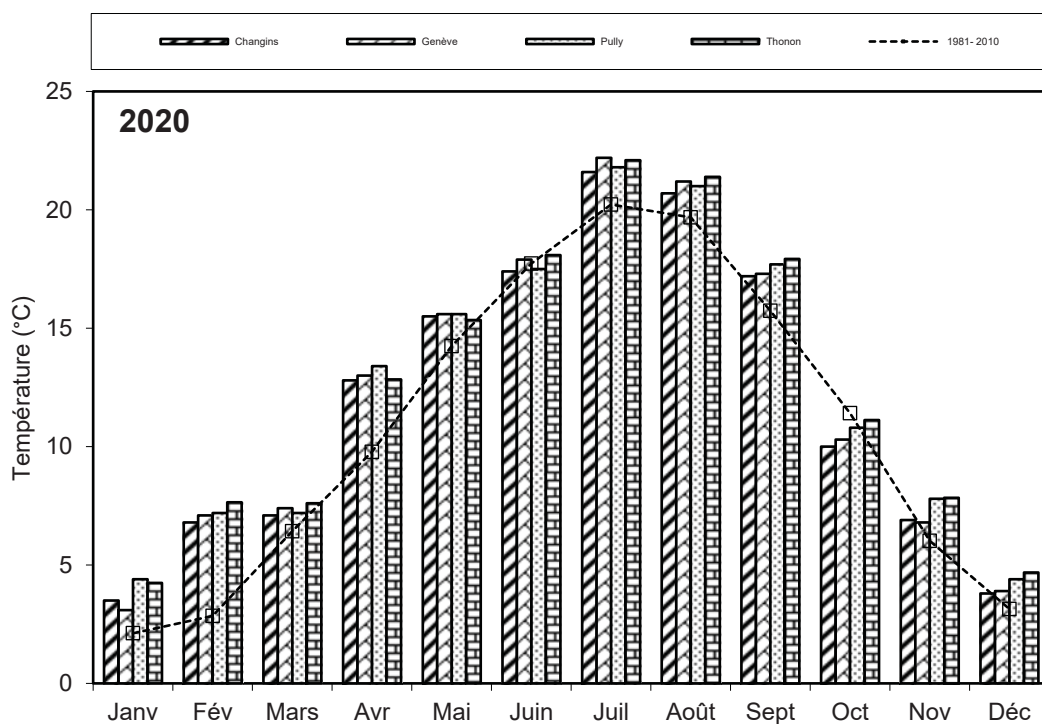


Figure 1.1 Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2020 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 1.1 Monthly mean of air temperature at each station in 2020 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

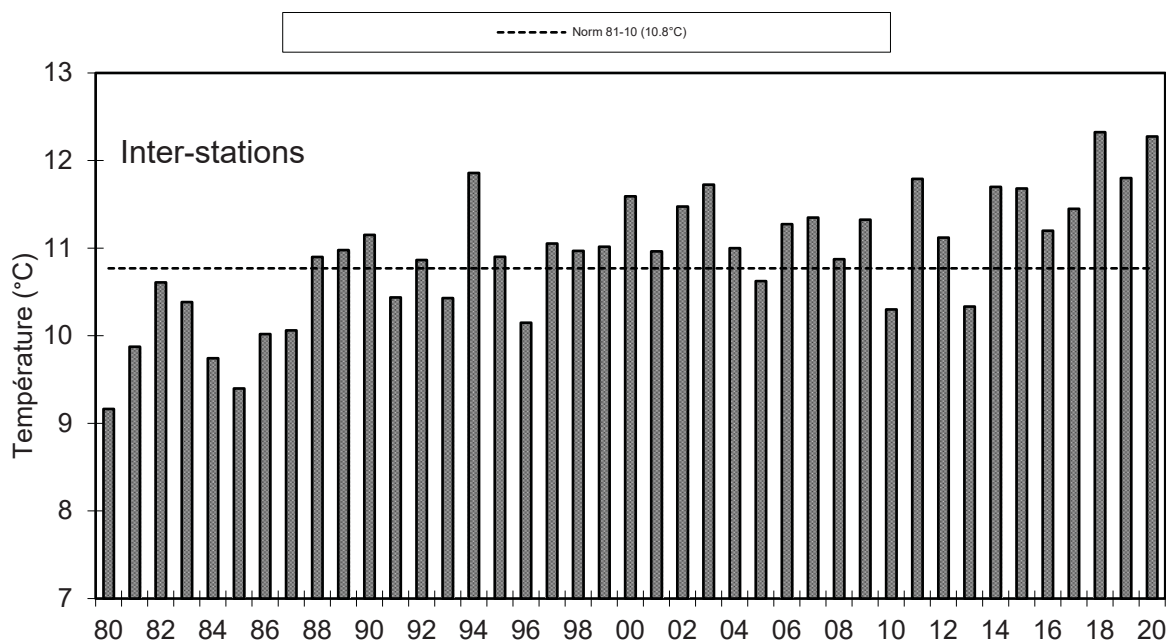


Figure 1.2 Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

Figure 1.2 Annual mean of air temperature for the inter-stations (°C).

3. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2020 sur le bassin lémanique est de 971.1 mm, soit 36 mm inférieur à la normale inter-stations (1'008.9 mm) relevée sur les 4 stations entre 1981 et 2010. Ce qui fait de l'année 2020 une année relativement sèche. Pully est la station la plus arrosée avec 1'060 mm, Genève avec 794 mm présente les précipitations les moins importantes (tableau 2.1, figure 2.1).

Après un mois de janvier sec, la pluviométrie pour le reste du premier semestre est globalement dans la normale. Pour le second semestre, la pluviométrie relevée est déficitaire pour les mois de juillet, septembre, novembre.

Tableau 2.1 Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2020.

Table 2.1 Monthly rainfall (mm) at each station in 2020.

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	28.9	37.7	32.2	24.5	72.9
Février	64	95.2	78.7	69.5	60.8
Mars	77.6	84.7	72.5	77	68.5
Avril	37.5	60.5	45.4	62.5	73.5
Mai	78.1	97.8	65.5	81.5	92.8
Juin	92.1	126.4	168.9	144.5	94.3
Juillet	16.9	23.8	29.4	30.5	83.8
Août	93.4	86.9	153.9	120	86.6
Septembre	60.6	70.6	72.2	90.5	99.0
Octobre	153.3	202.2	170.6	177	102.5
Novembre	15.8	15.8	38.3	34.5	83.0
Décembre	75.6	106.2	133.3	110	88.9
Total Annuel	793.8	1'007.8	1'060.9	1'022.0	1'008.9

En inter-stations, l'année 2020 se classe au 26^e rang (sur 40) de la chronologie pluviométrique 1981 - 2020 (la 1^{ère} étant 2001 avec 1'299 mm, la dernière étant 1989 avec 661 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
1981	1'082.8	2001	1'298.7
1982	1'037.5	2002	1'169.5
1983	1'022.3	2003	760.6
1984	911.8	2004	980.0
1985	957.1	2005	775.1
1986	964.2	2006	1'069.2
1987	1'044.8	2007	1'135.7
1988	1'078.0	2008	1'047.8
1989	660.7	2009	849.9
1990	1'093.9	2010	815.5
1991	860.3	2011	750.1
1992	1'057.8	2012	1'092.3
1993	1'060.5	2013	1'219.0
1994	1'124.1	2014	1'068.1
1995	1'194.7	2015	808.7
1996	972.8	2016	1'115.0
1997	1'022.9	2017	833.7
1998	924.6	2018	916.9
1999	1'266.0	2019	1'004.1
2000	1'028.2	2020	971.1

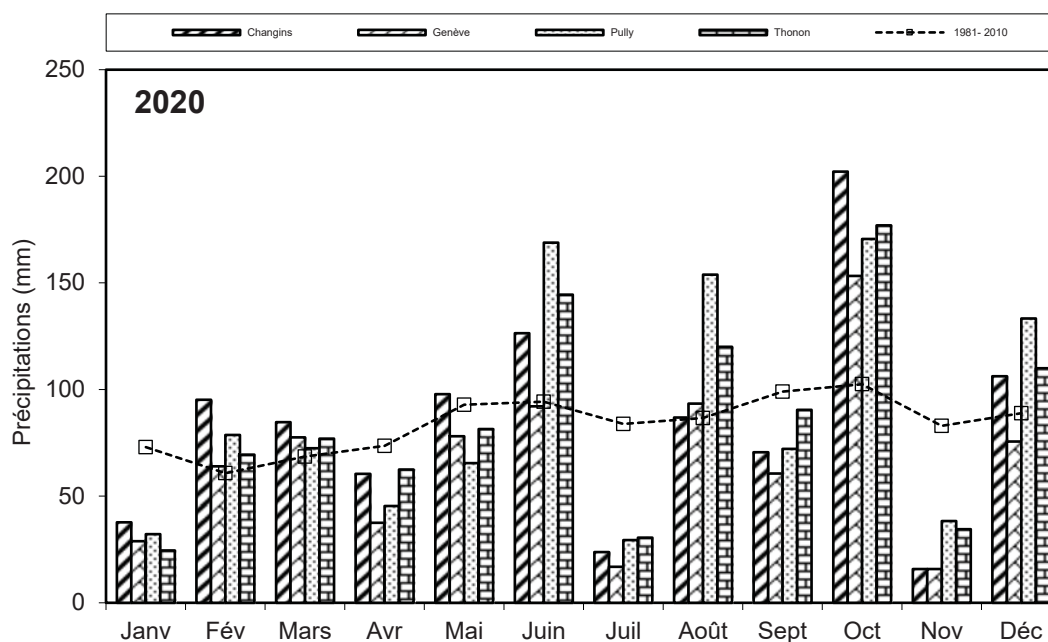


Figure 2.1 Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2020 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 2.1 Monthly rainfall at each station in 2020 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

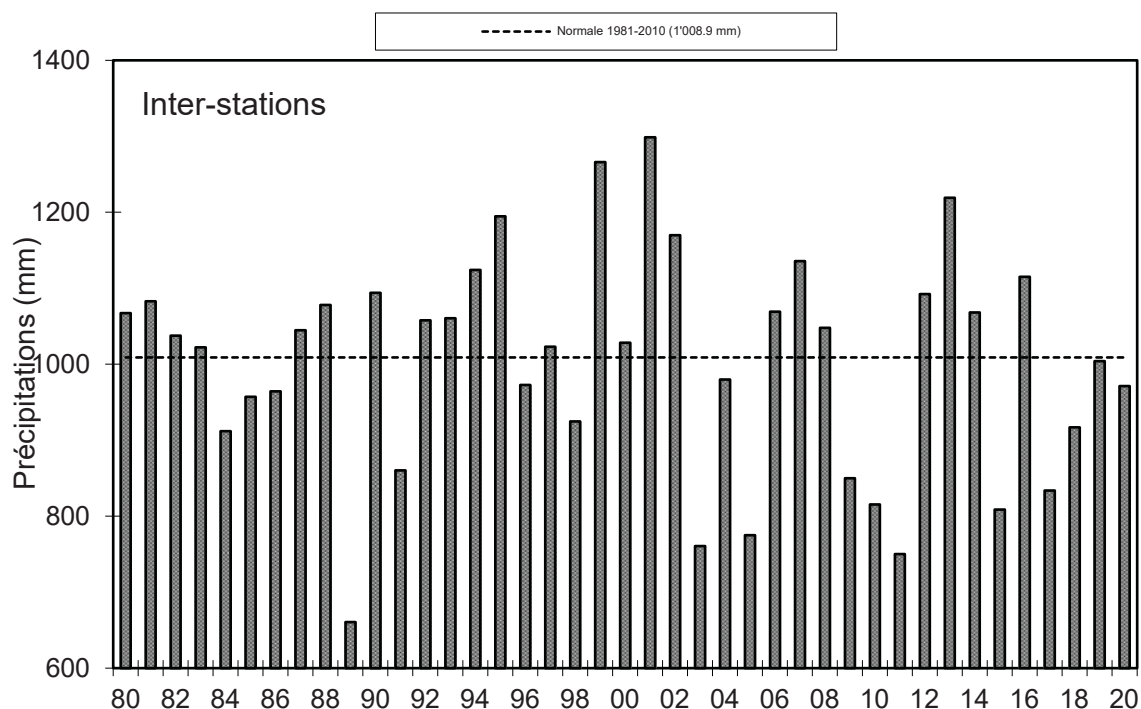


Figure 2.2 Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

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

4. INSOLATION

L'excédent d'insolation par rapport à la moyenne 1981-2010 fut relevé lors des 7 premiers mois de l'année (+298 h) (tableau 3.1, figure 3.1).

Tableau 3.1 Insolation mensuelle à chaque station en 2020 (h).

Table 3.1 Monthly insolation at each station in 2020 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	114	129	126	82	62.4
Février	127	136	126	125	90.7
Mars	184	196	184	197	156.4
Avril	252	262	265	266	182.1
Mai	263	272	261	285	208.1
Juin	210	197	206	260	236.7
Juillet	312	341	291	334	258.6
Août	245	241	238	257	236.8
Septembre	211	214	211	205	183.6
Octobre	80	87	89	98	120.0
Novembre	74	82	99	60	69.2
Décembre	41	40	28	32	49.8
Total annuel	2'112.6	2164.8	2'124.5	2'200.3	1'854.4

L'année 2020 avec une moyenne inter-stations de 2'150.6 heures est une année ensoleillée. Elle se classe quatrième sur la période 1980 – 2019 (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
1981	1'557.5	2001	1'837.6
1982	1'730.8	2002	1'828.6
1983	1'635.7	2003	2'290.5
1984	1'713.3	2004	2'000.1
1985	1'829.2	2005	2'138.4
1986	1'611.0	2006	1'992.4
1987	1'442.5	2007	2'096.7
1988	1'652.7	2008	1'961.9
1989	1'864.4	2009	2'028.4
1990	1'973.2	2010	1'817.3
1991	1'870.0	2011	2'203.0
1992	1'676.1	2012	2'008.4
1993	1'669.2	2013	1'813.2
1994	1'707.5	2014	1'902.8
1995	1'896.5	2015	2'028.6
1996	1'769.3	2016	1'847.7
1997	1'948.4	2017	2'089.5
1998	1'981.7	2018	2'042.3
1999	1'770.1	2019	2'152.8
2000	1'998.9	2020	2'150.6

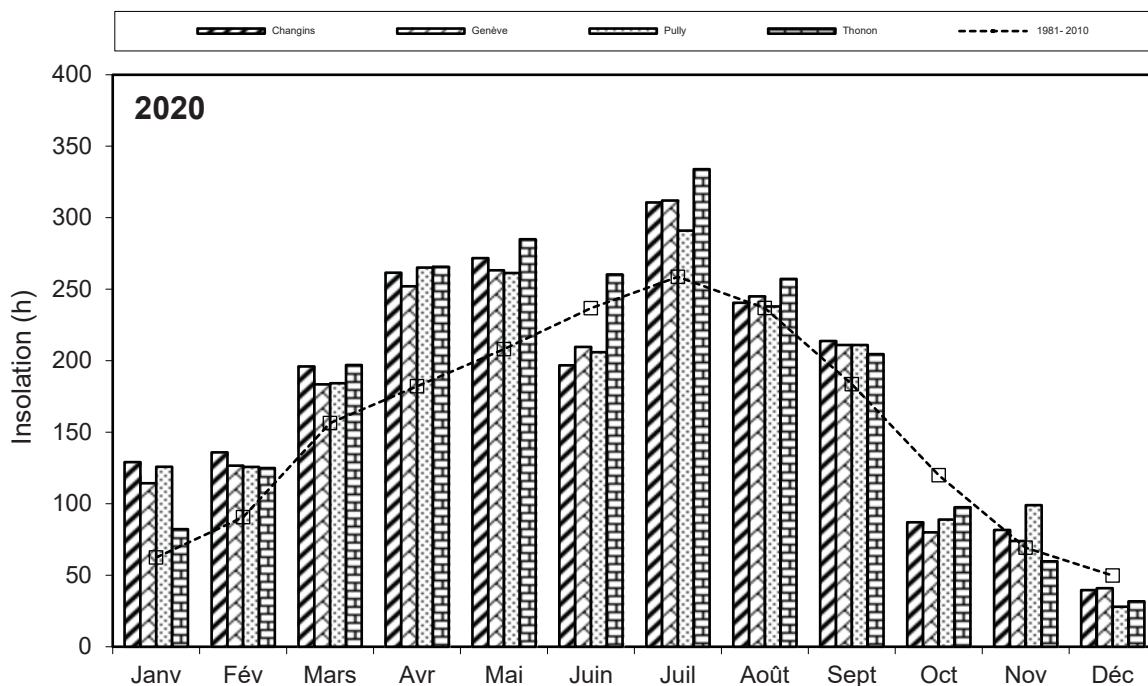


Figure 3.1 Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2020 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 3.1 Monthly insolation at each station in 2020 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

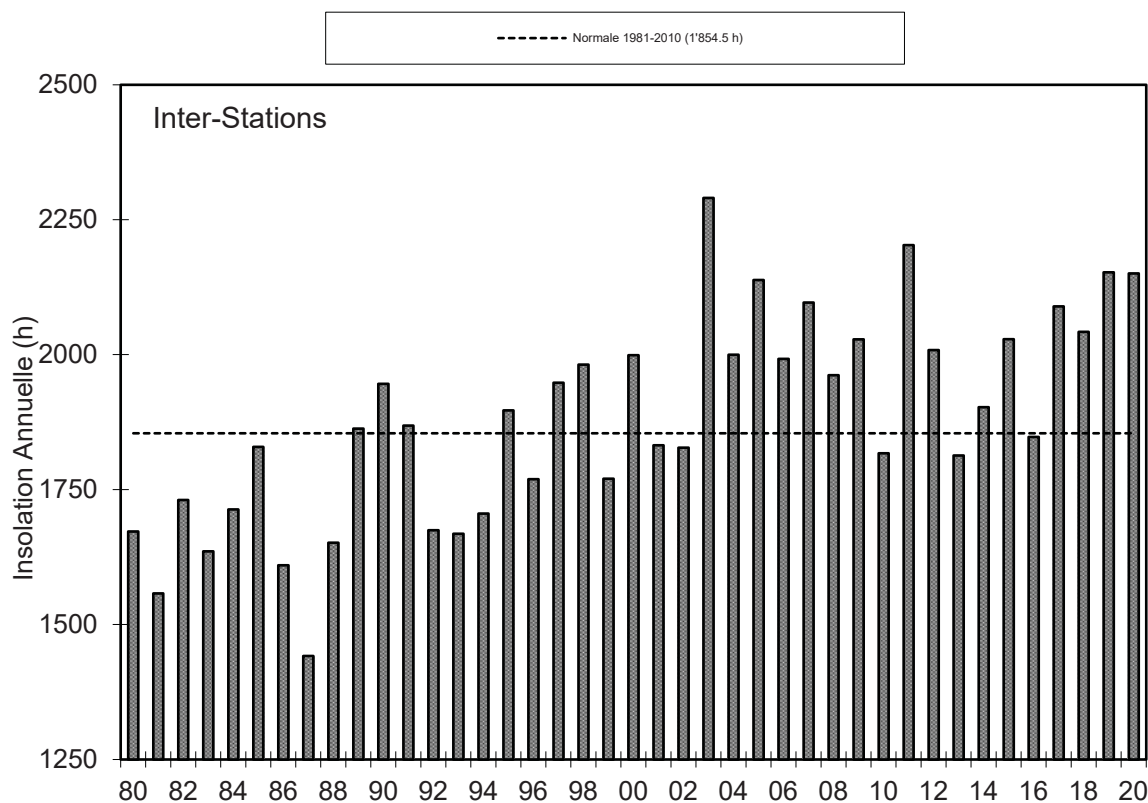


Figure 3.2 Insolation annuelle de l'inter-stations.

Figure 3.2 Annual insolation at the inter-stations.

5. RAYONNEMENT

La moyenne inter-stations pour l'année 2020 est de $13.7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (tableau 4.1, figure 4.1).

Tableau 4.1 Rayonnement global mensuel à chaque station en 2020 (moyenne journalière en $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).Table 4.1 Monthly mean of global radiation at each station in 2020 (mean daily irradiation in $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	4.8	5.2	5.2	4	3.6
Février	7.9	8	7.6	7.4	6.5
Mars	13.4	13.7	13.3	12.7	11.2
Avril	20.3	19.8	20.3	19.4	15.6
Mai	23.1	22.9	22	22.1	18.8
Juin	21.7	20.7	20.6	22	21.3
Juillet	25.8	25.6	24	25.1	21.3
Août	20.2	19.3	19.1	19.2	18.2
Septembre	15.9	15.6	14.9	14.6	13.4
Octobre	7.4	7.3	7.4	6.9	7.9
Novembre	4.7	4.9	5.4	3.8	4.3
Décembre	3.1	3	2.9	2.4	2.9
Moyenne Annuelle	14.0	13.8	13.6	13.3	12.1

Pour l'inter-stations en 2020, le rayonnement global annuel obtenu est de $4'995 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, ce qui classe l'année, seconde sur la période 1981 – 2020 (tableau 4.2, figure 4.2).

Tableau 4.2 Rayonnement global annuel en inter-stations ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$).Table 4.2 Annual solar radiation at the inter-stations ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Années	Rayonnement global total annuel	Années	Rayonnement global total annuel
1981	4'263	2001	4'310
1982	4'391	2002	4'337
1983	4'239	2003	4'894
1984	4'274	2004	4'858
1985	4'485	2005	4'712
1986	4'178	2006	4'593
1987	3'956	2007	4'671
1988	4'139	2008	4'486
1989	4'325	2009	4'837
1990	4'401	2010	4'575
1991	4'415	2011	5'000
1992	4'219	2012	4'747
1993	4'126	2013	4'547
1994	4'100	2014	4'653
1995	4'339	2015	4'869
1996	4'310	2016	4'584
1997	4'405	2017	4'923
1998	4'378	2018	4'922
1999	4'188	2019	4'981
2000	4'488	2020	4'995

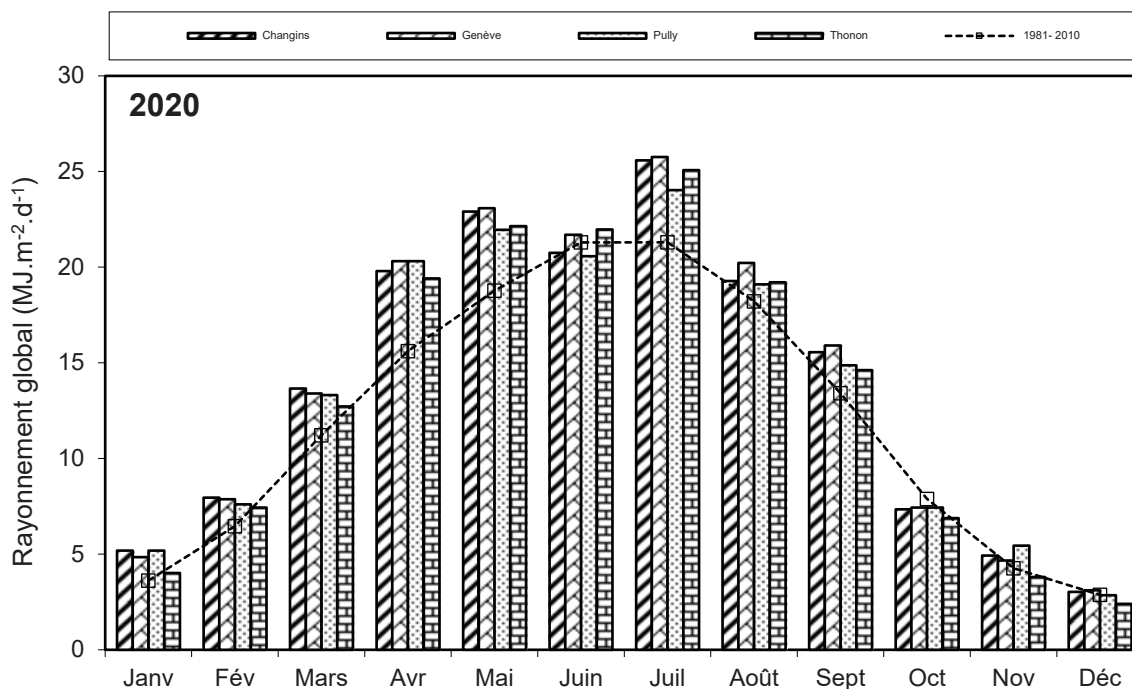
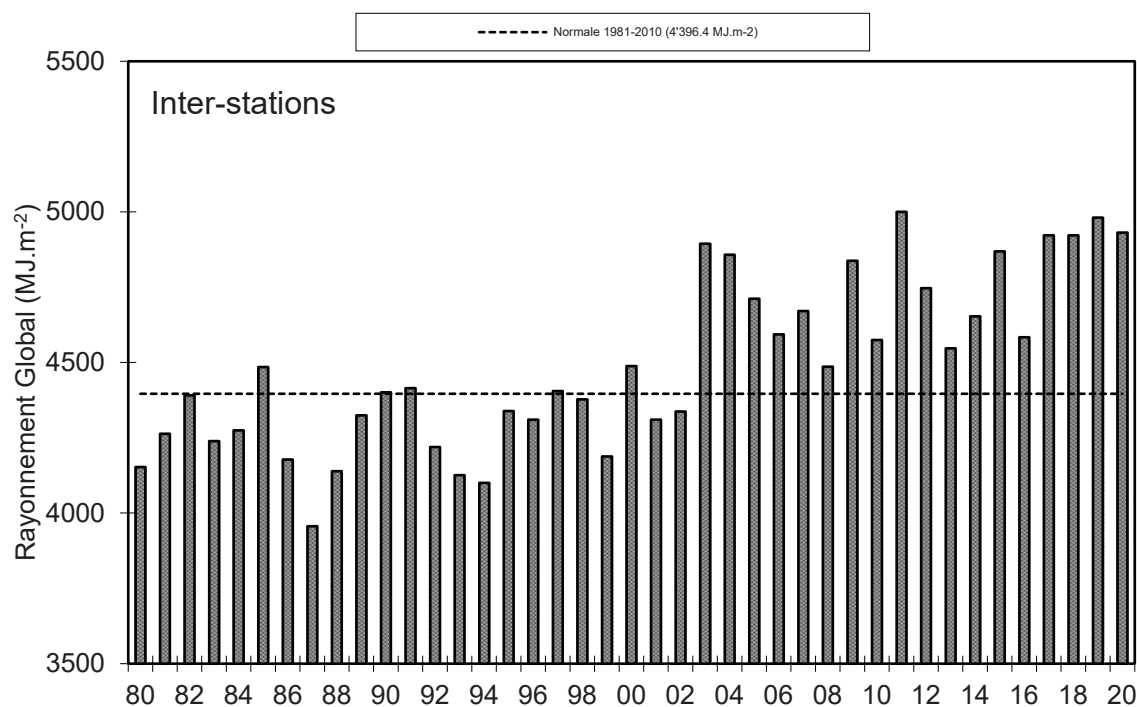


Figure 4.1 Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2020 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 4.1 Monthly mean of global solar radiation at each station in 2020 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

Figure 4.2 Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m^{-2}).Figure 4.2 Annual global solar radiation at the inter-stations (MJ.m^{-2}).

6. VENT

6.1. VITESSE DU VENT

En 2020 à Changins, station de référence, le 1^{er} trimestre ainsi que les mois de mai et juillet furent venteux. Les autres mois présentèrent des vitesses de vent égales ou inférieures à la moyenne de la période 1981-2010 (tableau 5.1, figure 5.1 et tableau 5.2).

Tableau 5.1 Moyenne mensuelle de la vitesse du vent en 2019 (m.s^{-1})Table 5.1 Mean monthly wind speeds in 2019 (m.s^{-1}).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1981-2010
Janvier	2.2	2.5	1.7	1.1	2.4
Février	3.6	3.9	2.2	1.9	2.8
Mars	3	3.3	1.9	2	3.3
Avril	2.2	2.2	1.7	1	3.3
Mai	3.3	3.6	2.2	1.6	2.8
Juin	2.2	2.2	1.7	1.1	2.8
Juillet	2.2	2.8	1.9	1.5	2.7
Août	2.2	2.2	1.7	1.1	2.6
Septembre	2.2	2.2	1.9	1.1	2.6
Octobre	2.5	2.5	1.9	1.6	2.4
Novembre	1.7	1.9	1.4	1.4	2.5
Décembre	2.2	2.2	1.7	1.3	2.6
Moyenne annuelle	2.5	2.6	1.8	1.4	2.7

Pour l'année 2020 à Changins, il a été enregistré 27 jours de vent fort ($> 5 \text{ m.s}^{-1}$) dont 21 jours durant le 1^e semestre (dont 15 pour le 1^e trimestre). Le maximum de vent moyen journalier a été relevé pour l'année 2020 le 30 mars (avec 9.42 m.s^{-1}) (figure 5.2). De plus, il y a eu en 2020, 2 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 Annual mean wind speed at Changins (m.s^{-1}).

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1981	2.5	2001	2.8
1982	2.6	2002	2.6
1983	2.7	2003	2.3
1984	3.4	2004	2.4
1985	3.0	2005	2.2
1986	2.9	2006	2.4
1987	2.7	2007	2.7
1988	3.1	2008	2.5
1989	3.0	2009	2.6
1990	3.1	2010	2.6
1991	3.2	2011	2.2
1992	2.8	2012	2.6
1993	2.9	2013	2.4
1994	2.7	2014	2.3
1995	2.9	2015	2.5
1996	2.7	2016	2.4
1997	2.5	2017	2.4
1998	3.0	2018	2.6
1999	2.9	2019	2.1
2000	2.6	2020	2.6

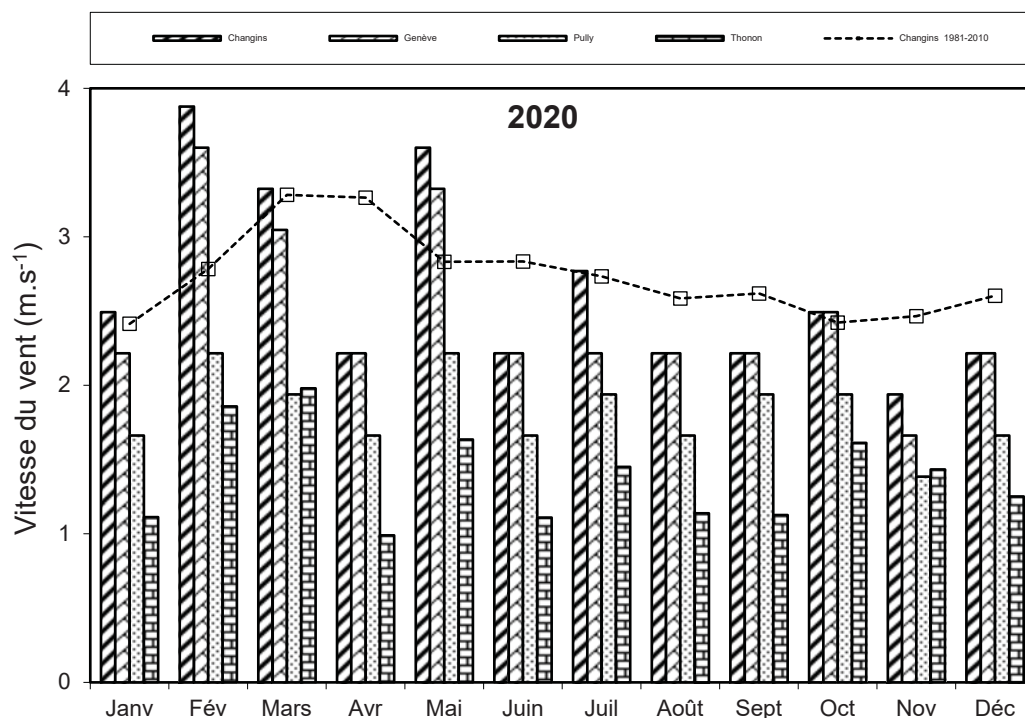


Figure 5.1 Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2020 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 5.1 Monthly mean wind speed at each station in 2020 (histogram), and at Changins for the period 1981 - 2010 (curve).

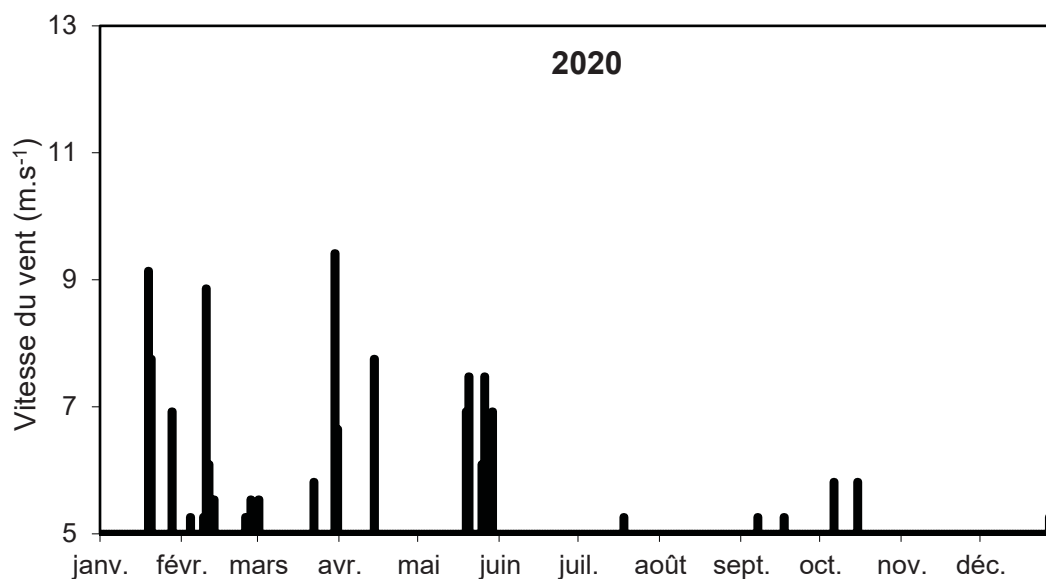


Figure 5.2 Répartition annuelle (en 2020) des vents forts (> 5 m.s^{-1}) à Changins.

Figure 5.2 Annual distribution (in 2020) of strong winds (> 5 m.s^{-1}) at Changins.

6.2. ROSE DES VENTS

Pour l'année 2020 à Changins, 63.5 % des vents (figure 5.3) se répartissent selon le demi-cercle S-O-N. Les vents qui sont supérieurs à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ représentent 13.5% des vents totaux, 49 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; et 40 % sont d'origine opposée S-O.

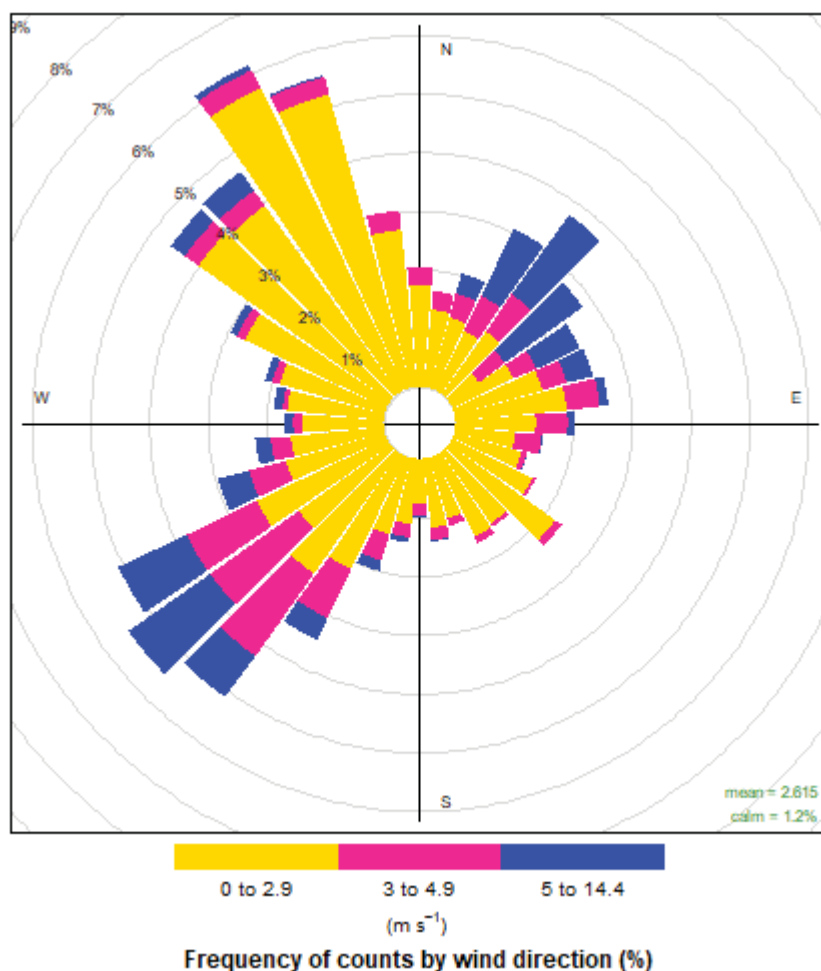


Figure 5.3 Rose des vents moyens à Changins en 2020 (calculée en moyennes horaires de la vitesse du vent - échelle: % d'occurrence).

Figure 5.3 Wind directions at Changins in 2020 (calculated as the hourly mean wind-scale velocity : % occurrence).