

ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

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

CAMPAGNE 2019

PAR

Viet TRAN KHAC, Philippe QUETIN et Orlane ANNEVILLE

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (INRAE-UMR/CARRETEL), CS 50511, FR - 74203 THONON-LES-BAINS Cedex

RÉSUMÉ

L'année 2019 est la troisième année la plus chaude depuis 1980, derrière 2018 et 1994 et au même rang que 2011. La température moyenne annuelle de l'air inter-stations est de 11.8 °C, soit supérieure de 1.0 °C à la normale de la période 1981-2010. L'année 2019 est normalement venteuse, bien ensoleillée et avec une pluviométrie dans la moyenne de la chronique 1981-2010.

L'hiver 2019 n'a pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. La profondeur du brassage hivernal est observée à 135 m. La température de l'eau à 309m continue d'augmenter depuis le dernier brassage hivernal complet en 2012. Entre 2012 et 2019, la température à 309m a augmenté de 0.73 °C. Les couches d'eau profondes ne sont pas réoxygénées. La concentration en oxygène dissous à 309m reste inférieure à 4 mgO₂/L tout au long de l'année 2019.

La température moyenne de l'eau entre 0 et 10m montre un réchauffement important en hiver et en automne. En 2019, l'activité phytoplanctonique est forte aux mois d'avril et septembre.

La concentration moyenne en phosphore total reprend sa tendance à la baisse après une augmentation particulière en 2018. Elle est de 16.20 µgP/L, soit une diminution de 3.20 µgP/L par rapport à l'année 2018. La concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore soluble réactif est de 11.91 µgP/L en 2019, soit une diminution de 2.58 µgP/L par rapport à l'année 2018.

ABSTRACT

The year 2019 together with 2011, were the third warmest year since 1980, after 2018 and 1994. The inter-station annual average temperature was 11.8 °C. It was 1.0 °C above the reference value calculated over the period 1981 – 2010. The year 2019 was sunny, wind and rainfall values were within the range observed during the period 1981-2010.

The weather conditions of the year 2019 did not allow a complete winter mixing of the water column of Lake Geneva. The partial mixing has reached 135m depth. Water temperature at 309m has been increasing since the last complete winter mixing in 2012. Between 2012 and 2019, the temperature at 309m increased by 0.7 °C. Deep water layers were not reoxygenated. The dissolved oxygen concentration at 309m remained under 4 mgO₂/L throughout the year 2019.

Winter and Autumn average water temperature between 0 and 10m showed a significant warming. In 2019, phytoplankton activity was strong in April and September.

In 2019, the annual average concentration of total phosphorus was 16.20µg/L. The annual average concentration of orthophosphate was 11.91 µgP/L in 2019.

1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman réalisé dans le Grand Lac à la station SHL2 en 2019, et présente l'évolution de 17 paramètres (température, pH, conductivité, titre alcalimétrique complet, oxygène dissous, phosphore total, orthophosphate, phosphore total particulaire, azote total, azote ammoniacal, nitrate, azote organique particulaire, chlorure, carbone organique particulaire, silice, chlorophylle-*a* et transparence).

Le suivi de la physico-chimie des eaux du Grand Lac (éléments majeurs) est en place depuis 1957.

Le suivi annuel du Petit Lac (point GE3) donne lieu tous les 5 ans à une publication de synthèse. Le dernier rapport a été publié en 2015, par conséquent le prochain est prévu en 2020.

L'ensemble des conditions météorologiques de l'année 2019 (température de l'air, pluviométrie, insolation, 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 1973-2019 archivées sur l'Observatoire OLA (Observatoire des Lacs Alpains) (SOERE OLA-IS 2019).

2. METHODES

Les stations de mesure des paramètres physico-chimiques dans les eaux du Léman sont représentées sur la figure 1.

- 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) ;
- GE3 située au centre du Petit Lac dans la fosse de Chevrens entre Coppet et Chevrens (coord. CH: 506.100/128.040) (-71 m).

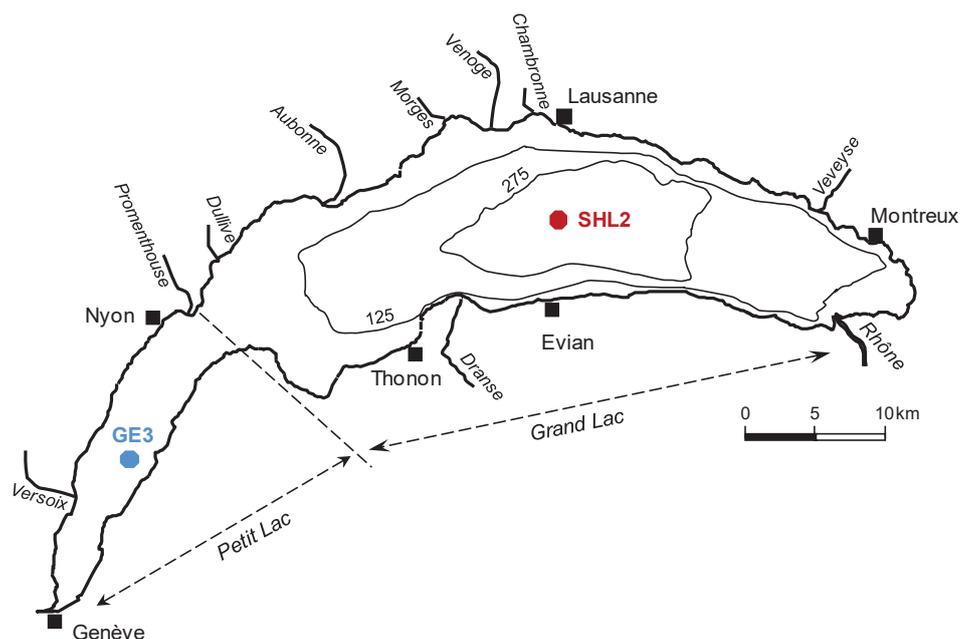


Figure 1 : Situation des points de prélèvement sur le Léman

Figure 1 : Location of the sampling stations in 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 changent, 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.

Il y a eu 19 campagnes de prélèvements en 2019, 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 campaigns, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Campagne n°	Date	Campagne n°	Date
1	15.01.2019	11	24.07.2019
2	14.02.2019	12	05.08.2019
3	06.03.2019	13	28.08.2019
4	21.03.2019	14	11.09.2019
5	01.04.2019	15	24.09.2019
6	23.04.2019	16	14.10.2019
7	20.05.2019	17	28.10.2019
8	03.06.2019	18	13.11.2019
9	26.06.2019	19	10.12.2019
10	11.07.2019		

Les prélèvements sont effectués selon des techniques uniformisées par l'UMR CARTEIL INRAE de Thonon-les-Bains (Unité Mixte de Recherche entre l'INRAE et l'Université de Savoie ; 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 CARTEIL INRAE de Thonon-les-Bains. Les méthodes utilisées selon les normes de qualité de l'eau normalisées AFNOR et 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 normalisé (disque noir et blanc, 20 cm). De 1957 à mi-2009, cette mesure était effectuée uniquement avec le disque de Secchi 'INRAE' non-normalisé (disque blanc d'un diamètre de 30 cm). Une comparaison statistique de la transparence mesurée par les deux types de disque de Secchi durant la période de mi-2009 à 2015 a été réalisée. L'analyse statistique montre que les valeurs obtenues pour les deux types de disques sont significativement corrélées à l'échelle de l'année ($R^2 = 0,93$; $n > 100$) (Quetin et al., 2020). Depuis 2016, seul le disque de Secchi normalisé est employé.

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

L'année 2019 est la troisième année la plus chaude depuis 1980, derrière 2018 et 1994 et au même rang que 2011. En 2019, la température moyenne annuelle de l'air inter-stations est de 11.8 °C, soit supérieure de 1.0 °C à la normale de la période 1981-2010, dont la moyenne est de 10.8°C. L'année 2019 se distingue de la chronique avec une température moyenne mensuelle supérieure à la normale 1981-2010 sur l'ensemble de l'année, excepté pour les mois de mai (Annexe V).

La température moyenne pondérée des couches d'eau superficielles (0-10m) montre que les mois d'hiver de janvier (7.50 °C) et de mars (7.05°C) sont plus chauds de 0.5 °C que l'année 2018. Les mois de mai et de juin en 2019 sont respectivement plus froids de 3.23 °C et de 5.76°C que l'année 2018. En automne et en fin de l'année 2019, l'eau de surface est plus chaude de 0.26 °C à 1.70 °C par rapport à l'année 2018 (Figure 2).

Les conditions météorologiques de l'hiver 2019 n'ont pas permis un brassage hivernal complet de la colonne d'eau. D'après le suivi scientifique du Léman, le brassage hivernal partiel s'est effectué jusqu'à 135m de profondeur à la date du 14 février 2019 (Figure 3a, Figure 4). Durant l'hiver, la température la plus basse observée au fond du lac est de 5.8 °C le 15 janvier 2019 soit 0.1°C et 0.2°C de plus qu'en 2018 et 2017. Ce brassage 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 3.01 mgO₂/L lors du brassage (Figure 3a).

Au mois d'avril en 2019, la température moyenne de l'air inter-stations est de 10.0 °C, soit 0.2°C de plus par rapport à la normale de la période 1981-2010. Les couches superficielles se réchauffent à partir du 23 avril 2019, et la stratification thermique se met en place, ce qui entraîne la reprise de l'activité phytoplanctonique (Figure 3b, Figure4). D'après les mesures *in-situ* de la sonde multi-paramètre, la concentration en chlorophylle-a est de 15.93 µgChla/L à 11.30 m au 23 avril 2019, qui correspond à une concentration en oxygène dissous à 12.68mgO₂/L soit 106 % en saturation d'oxygène.

Les concentrations maximales en oxygène dans l'épilimnion sont de 13.94 mgO₂/L à 5.75m au 23 avril 2019 et 14.25 mgO₂/L à 5.25m au 03 juin 2019. Ces pics d'oxygène dissous correspondent à une activité phytoplanctonique importante durant la phase printanière (1 au 23 avril) (Rimet, 2019).

La stratification estivale maximale est observée le 28 août 2019 avec la température sur 0-10m est de 21.9 °C contre 26.1°C au mois d'août 2018 et 24.5°C au mois de juillet 2017 (Figure 3c). L'année 2019 est la troisième année la plus chaude depuis 1980. La déstratification thermique automnale de la masse d'eau arrive plus tardivement au 13 novembre 2019 par rapport aux années 2016 et 2017 (Figure 3d).

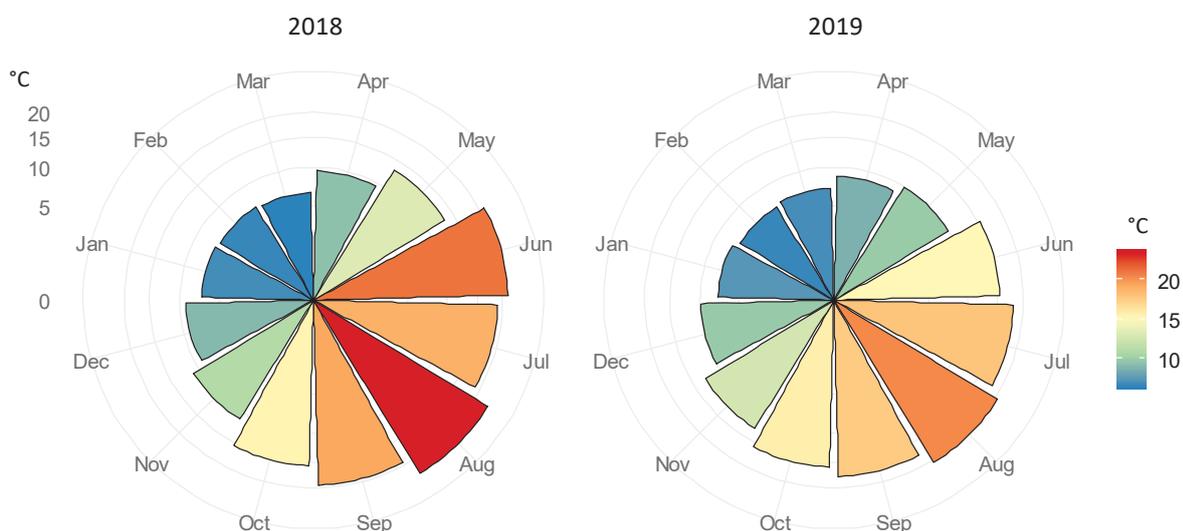


Figure 2 : Température moyenne mensuelle pondérée dans la couche superficielle (0-10 m) en 2018 et 2019, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 2 : Monthly weighted average temperature in water surface layer (0-10m) in 2018 and 2019, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

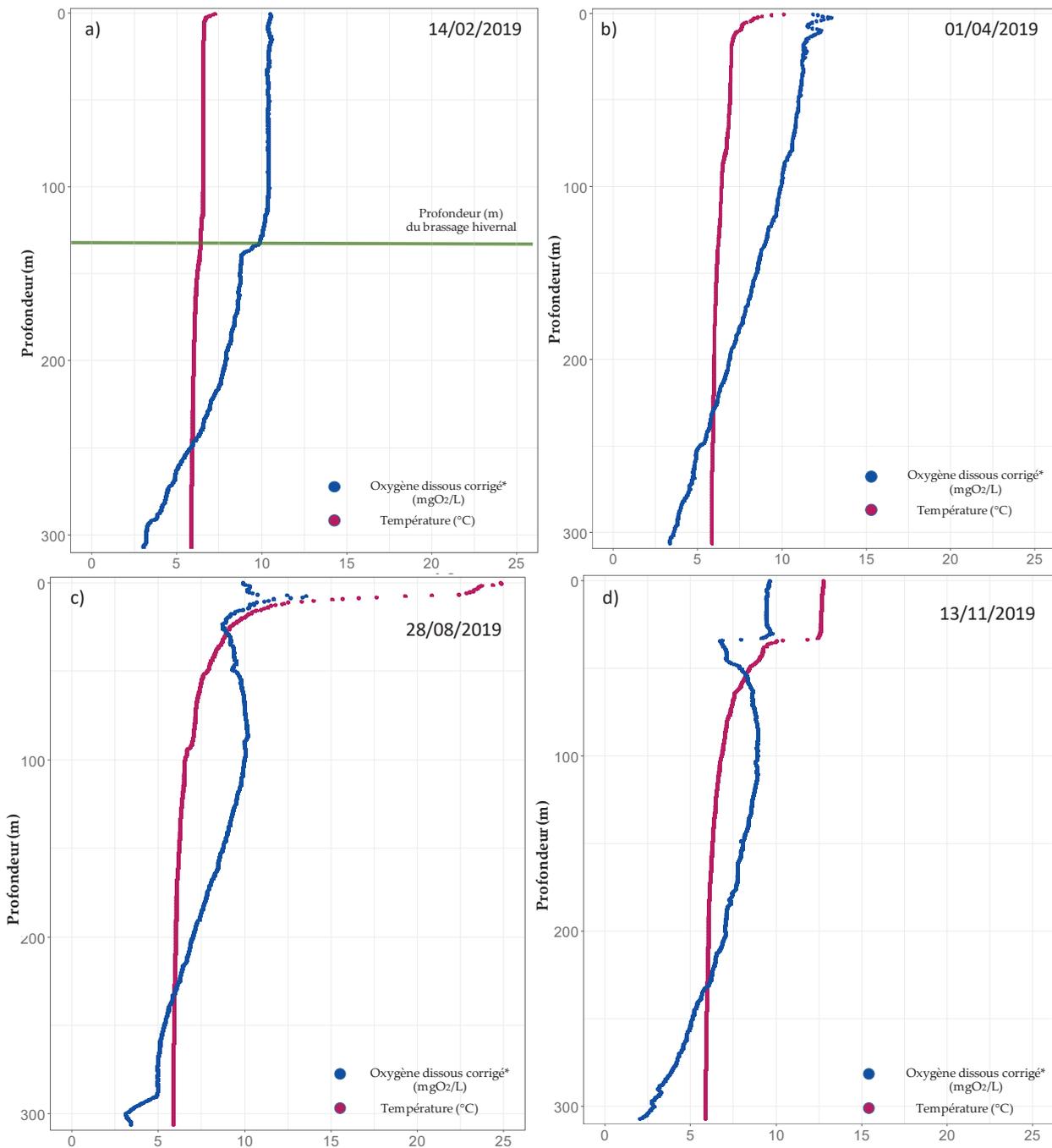


Figure 3 : Profil physico-chimique réalisé à l'aide de sondes multi-paramètres, Léman - Grand Lac (SHL2) :

- a) en hiver lors du brassage partiel maximal (14.02.2019),
- b) au printemps (01.04.2019),
- c) en été (28.08.2019),
- d) en automne (13.11.2019).

Figure 3 : Physico-chemical profile made with multi-parameters probes, Lake Geneva - Grand lac (SHL2) :

- a) in winter after maximal water mixing (14.02.2019),
- b) in spring (01.04.2019),
- c) in summer (22.08.2019),
- d) in autumn (13.11.2019).

* Profil de sonde pour la concentration en oxygène dissous corrigée par une homothétie avec les mesures effectuées en laboratoire selon la méthode de Winkler sur des échantillons de profondeur définie

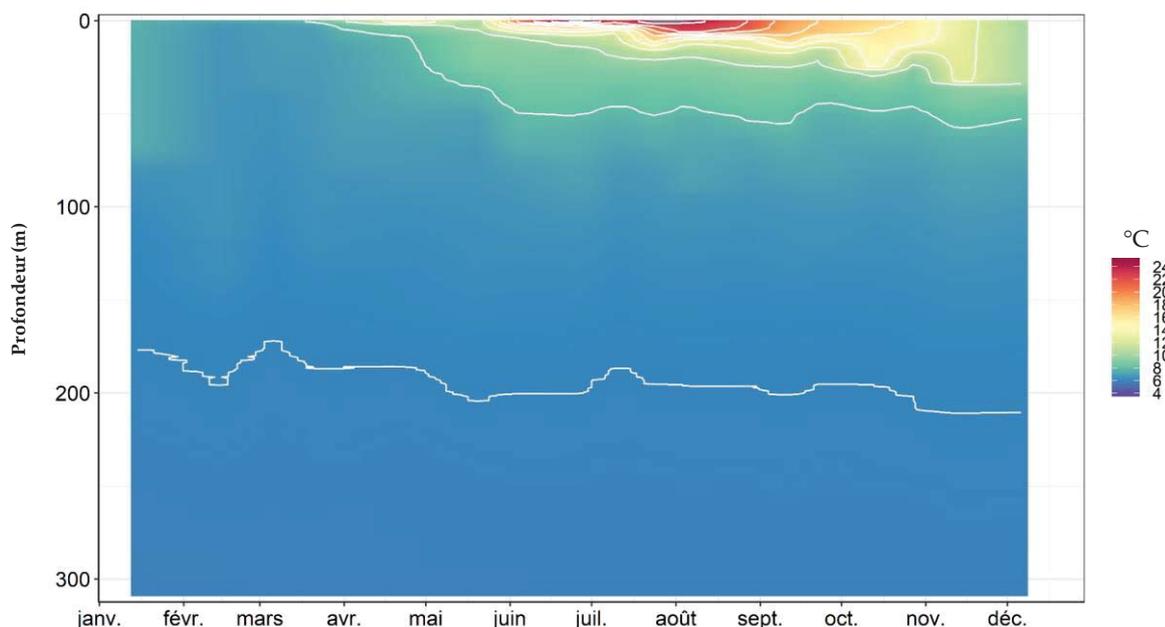


Figure 4 : Température des eaux du lac en 2019 (iso-contour en blanc), Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 4 : Water temperature in the lake in 2019 (iso-contour lines in white), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

La variation saisonnière et interannuelle de la température de différentes couches d’eau est présentée dans la figure 5. Les couches d’eau à 50m et 100m représentent une variabilité saisonnière et interannuelle plus marquées que les couches profondes de 200m et 309m.

Dans les couches profondes, la température de l’eau passe de 5.12 °C en 2012 à 5.85 °C en 2019, soit une augmentation de 0.73°C en 7 ans. L’absence de brassage hivernal complet explique l’augmentation de la température observée ces dernières années (Figure 5).

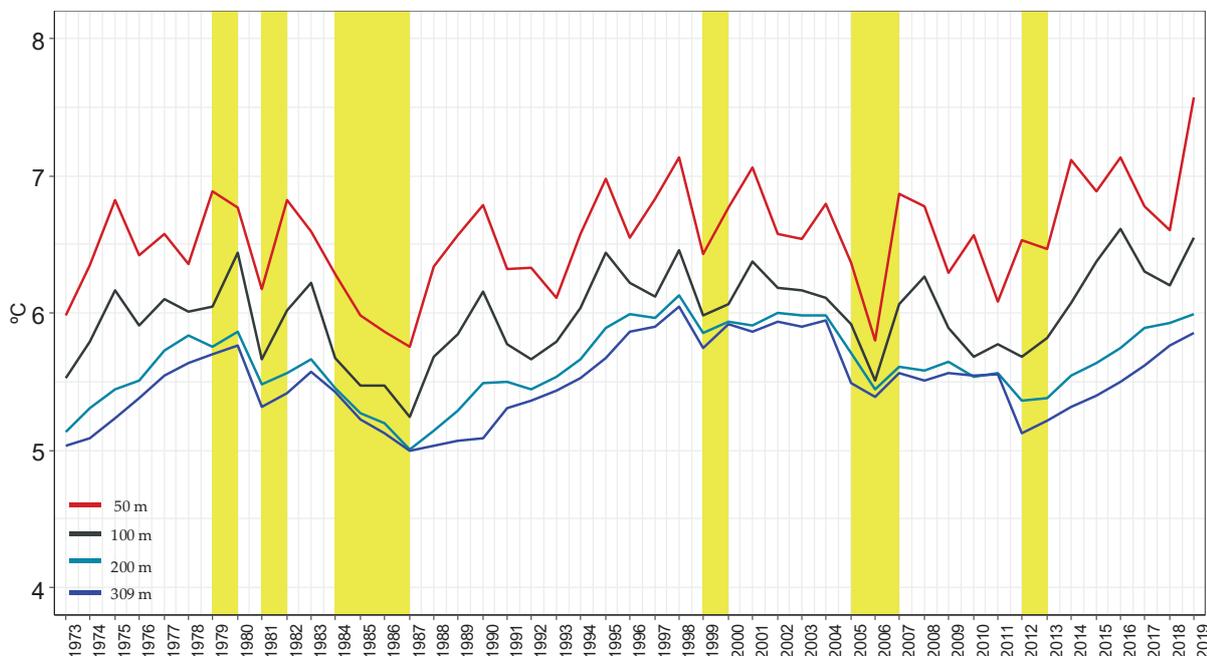


Figure 5 : Evolution de la température moyenne annuelle de l’eau dans le lac aux profondeurs de 50, 100, 200 et 309 mètres de 1973 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 5 : Inter-annual changes in annual mean water temperature in the lake at depths of 50, 100, 200 and 309 meters from 1973 to 2019, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent the complete turnover during winter.

La température moyenne annuelle pondérée dans la couche superficielle (0-10m) montre une tendance au réchauffement statistiquement significative depuis 1973 (p -value < 0.005) (figure 6). Néanmoins, en 2019, la température de cette couche est de 12.36 °C, soit une diminution de 1°C par rapport à l'année 2018. Cette diminution est probablement liée aux températures de l'air qui étaient plus basses qu'en 2018 (en Annexe Tableau 2).

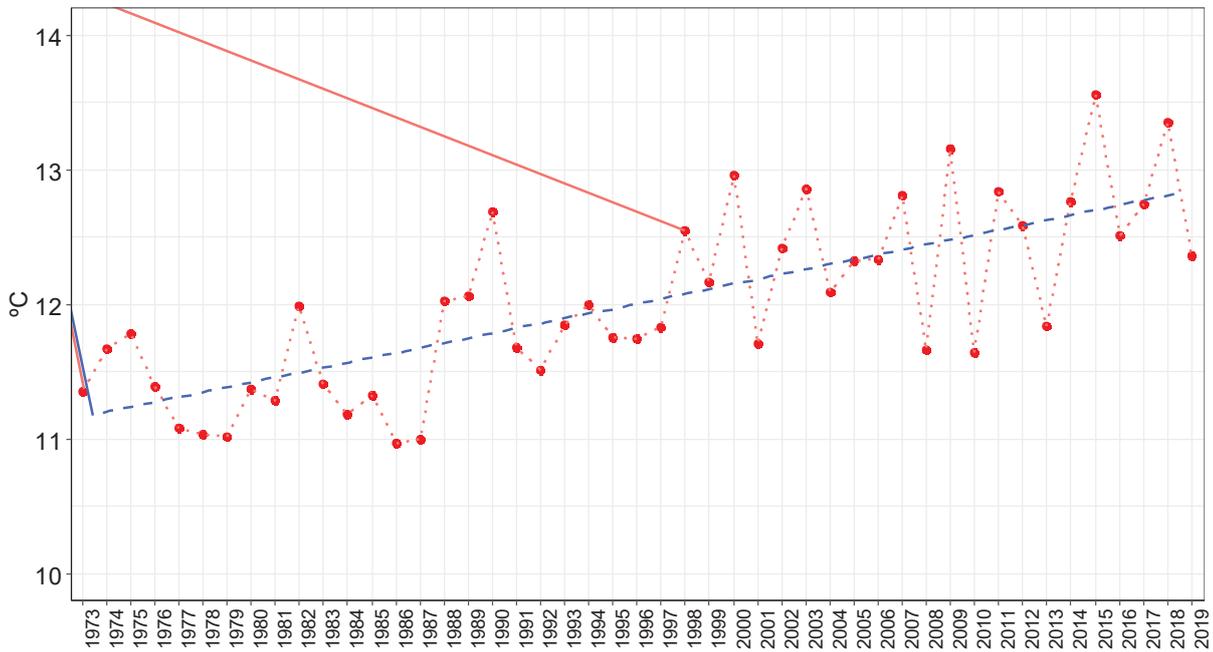


Figure 6 : Evolution de la température moyenne annuelle pondérée de l'eau de la couche 0-10m de 1973 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 6 : Inter-annual changes in the weighted annual average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 to 2019, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La température de la couche 0-10m en 2019 (figure 7 – carrés rouges) est supérieure au 75ème percentile des températures mesurées sur la période 1973-2018 (figure 7 - boîtes à moustache) pendant les mois d’hiver et d’automne. En revanche, au printemps et en été, les températures mensuelles se situent entre la valeur du 25ème percentile et la médiane des températures mesurées sur la période 1973-2018.

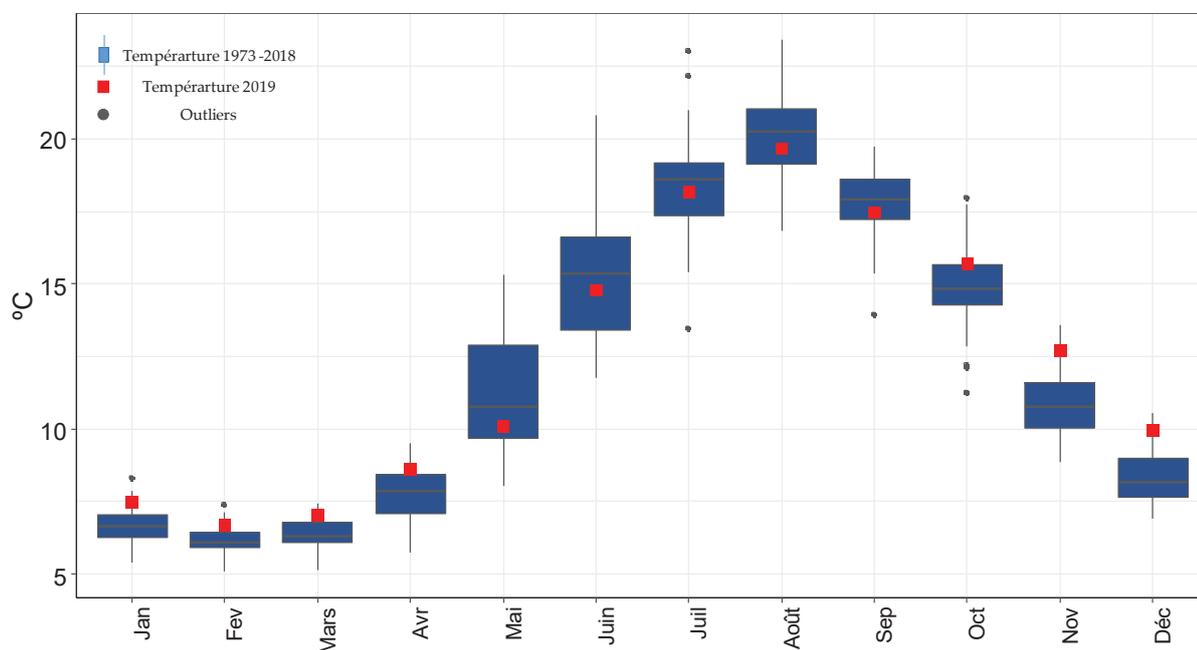


Figure 7 : Température moyenne mensuelle de l’eau de la couche (0-10m du 1973-2018 (boîte à moustache) et en 2019 (carré rouge) – Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 7 : Monthly average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 – 2018 (boxplot) and in 2019 (red square), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

4. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU LEMAN

4.1. 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 135m, le pH de la colonne d’eau oscille entre 7.58 et 8.02 tel que l’on peut l’observer sur le profil du 14 février 2019 en rouge (figure 8). La reprise de l’activité phytoplanctonique printanière provoque une augmentation du pH dans les premiers mètres de la colonne d’eau dès le début du mois d’avril 2019. 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 26 juin 2019, le pH moyen mesuré dans la couche 0-10m est de 8.77, soit supérieur de 0.7 à la valeur du pH à l’issue du brassage hivernal 2019. Le pH continue d’augmenter dans la couche 0-10m pour atteindre une valeur maximale de 8.86 au 28 août 2019, plus tôt qu’en 2018 (12 septembre 2018) et plus tard qu’en 2017 (04 juillet 2017). Les valeurs de pH élevées correspondent à des concentrations élevées en chlorophylle-a et des valeurs élevées de la production primaire entre avril et septembre (RASCONI et al 2020, ce rapport). Au mois de décembre 2019, 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.

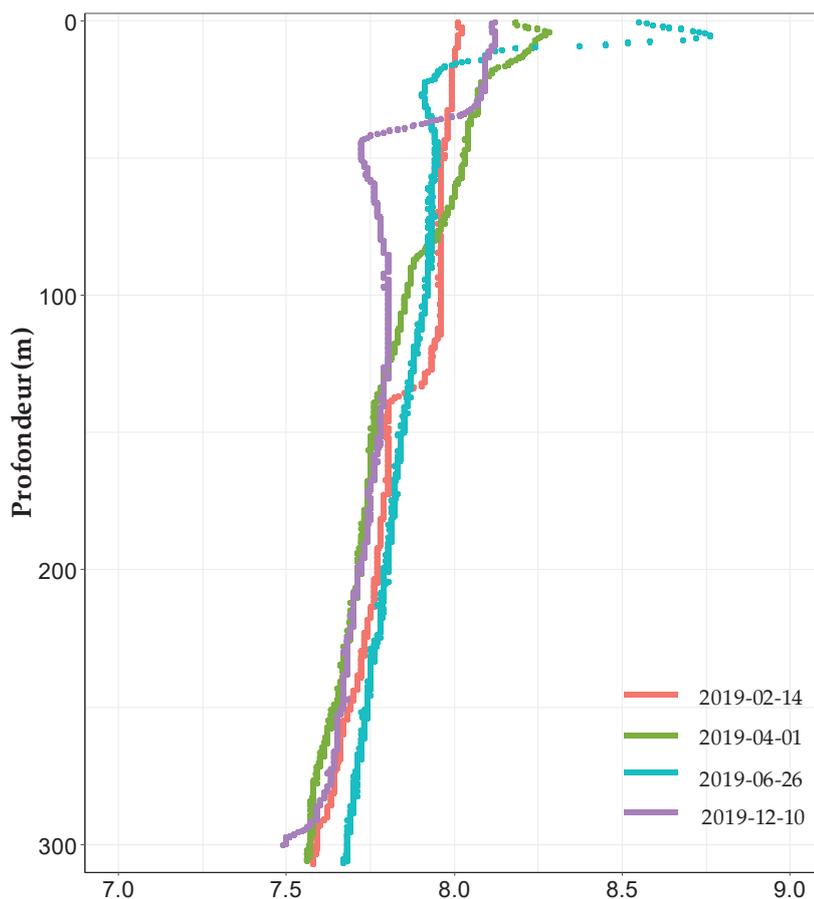


Figure 8 : pH des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal de la colonne d'eau (14/02/2019), de la reprise d'une activité photosynthétique significative (01/04/2019), du pic phytoplanctonique (26/06/2019) et à l'issue de la déstratification de la colonne d'eau (10/12/2019), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 8 : pH in the lake as a function of depth after maximal water mixing (14/02/2019), during recovery of significant photosynthetic activity (01/04/2019), during phytoplankton peak (26/06/2019) and after water column destratification (10/12/2019), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 9 représente l'évolution du pH dans la couche d'eau 0 - 30 m, de 1973 à nos jours. De janvier à mars 2019, la valeur du pH est supérieure ou égale au 75^{ème} percentile mesuré sur la chronique 1973-2018. Cette différence avec les années précédentes, pourrait témoigner d'une activité photosynthétique globalement plus importante, probablement en lien avec des températures hivernales de l'eau plus élevées que les années précédentes (figure 7). Quant aux mois d'avril et de mai, le pH est inférieur au 25^{ème} percentile calculé sur la chronique 1973-2018 (figure 9). Ces faibles valeurs au mois d'avril et de mai sont confirmées avec les données in-situ des sondes multi-paramètre. Elles sont expliquées par une intensité de production primaire au mois d'avril et de mai 2019 plus faible que celles des années 2015-2018 (RASCONI et al 2020, ce rapport). La biomasse phytoplanctonique dans les premiers mètres de la colonne d'eau est, en 2019, classée au troisième rang depuis les dix dernières années (2009-2019).

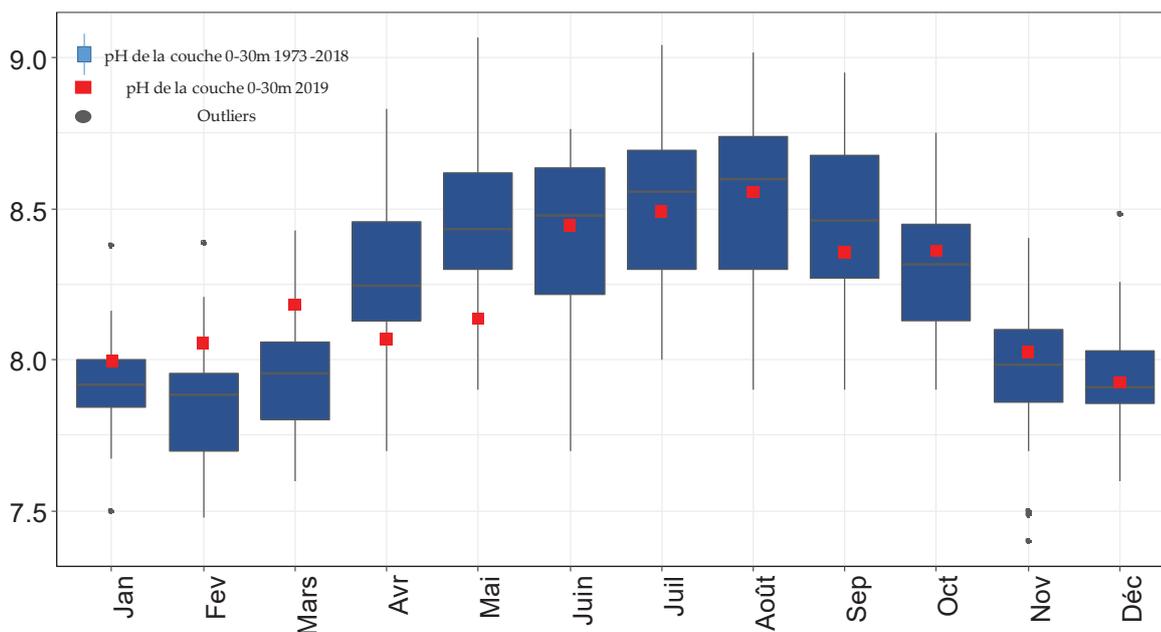


Figure 9 : Evolution du 90^{ème} percentile du pH mensuel à 25°C dans l'eau de la couche 0–30 m de 1973 à 2018 (boite à moustache) et en 2019 (carré rouge), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 9 : Change in 90th percentile of monthly pH at 25°C in the 0 - 30m layer from 1973 to 2018 (boxplot) and in 2019 (red square), Lake Geneva - Grand Lac SHL2

4.2. 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 10 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 294 et 325 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Par la suite, la conductivité commence à diminuer de manière significative dans l'épilimnion au début du mois d'avril, à partir de la reprise de l'activité phytoplanctonique. Cette diminution de la conductivité est importante durant les mois de juillet et septembre. La photosynthèse induite par le développement du phytoplancton entraîne donc l'augmentation du pH qui modifie à son tour 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 11 septembre 2019 avec des valeurs aux alentours de 253 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de 0 à 30 m tel que cela est représenté en vert sur la figure 10. 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.

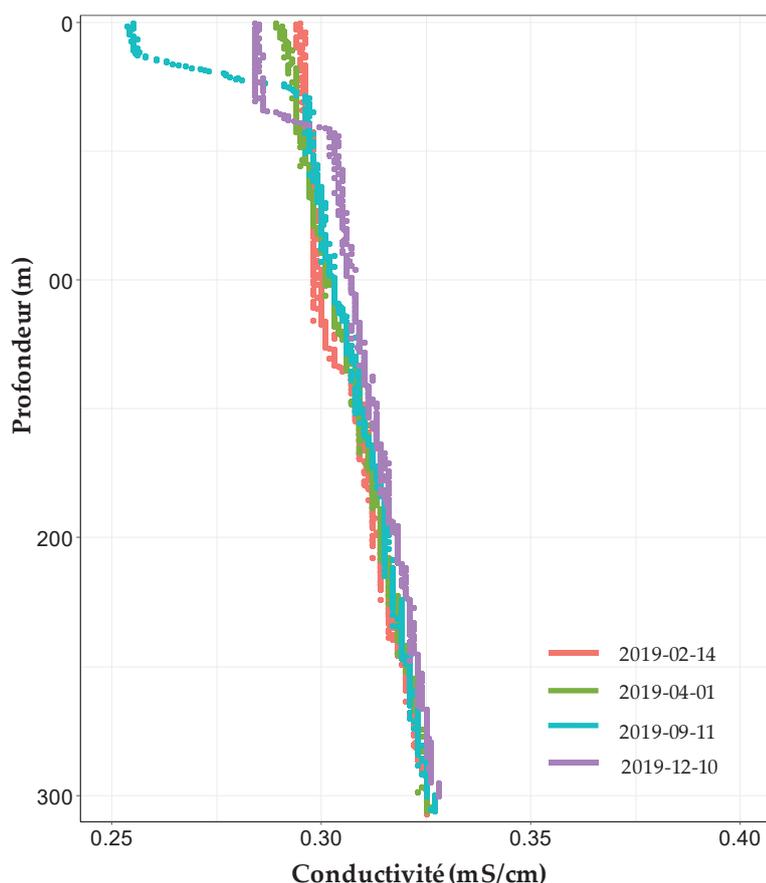


Figure 10 : Conductivité des eaux du lac en fonction de la profondeur lors du mélange partiel maximal de la colonne d'eau (14/02/2019), lors du démarrage significatif de la précipitation du carbonate de calcium (01/04/2019), lors de sédimentation maximale du carbonate de calcium (11/09/2019) et lors de l'enfoncement maximal de la thermocline (10/12/2019), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 10 : Conductivity in the lake as a function of depth after maximal water mixing (14/02/2019), during the beginning of significant calcium carbonate precipitation (01/04/2019), during maximal calcium carbonate sedimentation (11/09/2019) and after thermocline deepening (10/12/2019), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4.3. OXYGENE DISSOUS

La figure 11 montre l'évolution des profils de concentration en oxygène dans la colonne d'eau du lac entre 0 et 30 m. Elle met en évidence la production d'oxygène par la photosynthèse dans les couches superficielles à partir du mois d'avril 2019. Cette activité phytoplanctonique printanière engendre une sursaturation en oxygène à la surface qui atteint une valeur moyenne de 13.34 mgO₂/L le 23/04/2019.

La concentration en oxygène dissous dans les couches superficielles poursuit son augmentation pour atteindre la valeur moyenne maximale de 12.20 mgO₂/L le 23 avril 2019. Après cette date, la concentration en oxygène dans la couche 0-30m diminue progressivement à cause de la baisse de l'activité photosynthétique et atteint une valeur de 9.78 mgO₂/L le 28 août 2019. 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 20 m au mois d'octobre égal à 6.36 mgO₂/L en 2019 contre 5.7 mgO₂/L en 2018.

En 2019, 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 14 février 2019, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est égale à 2.84 mgO₂/L, soit plus faible de 0.68 mgO₂/L par rapport à la concentration de 2018. 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 inférieures au seuil de 4 mgO₂/L toute au long de l'année 2019.

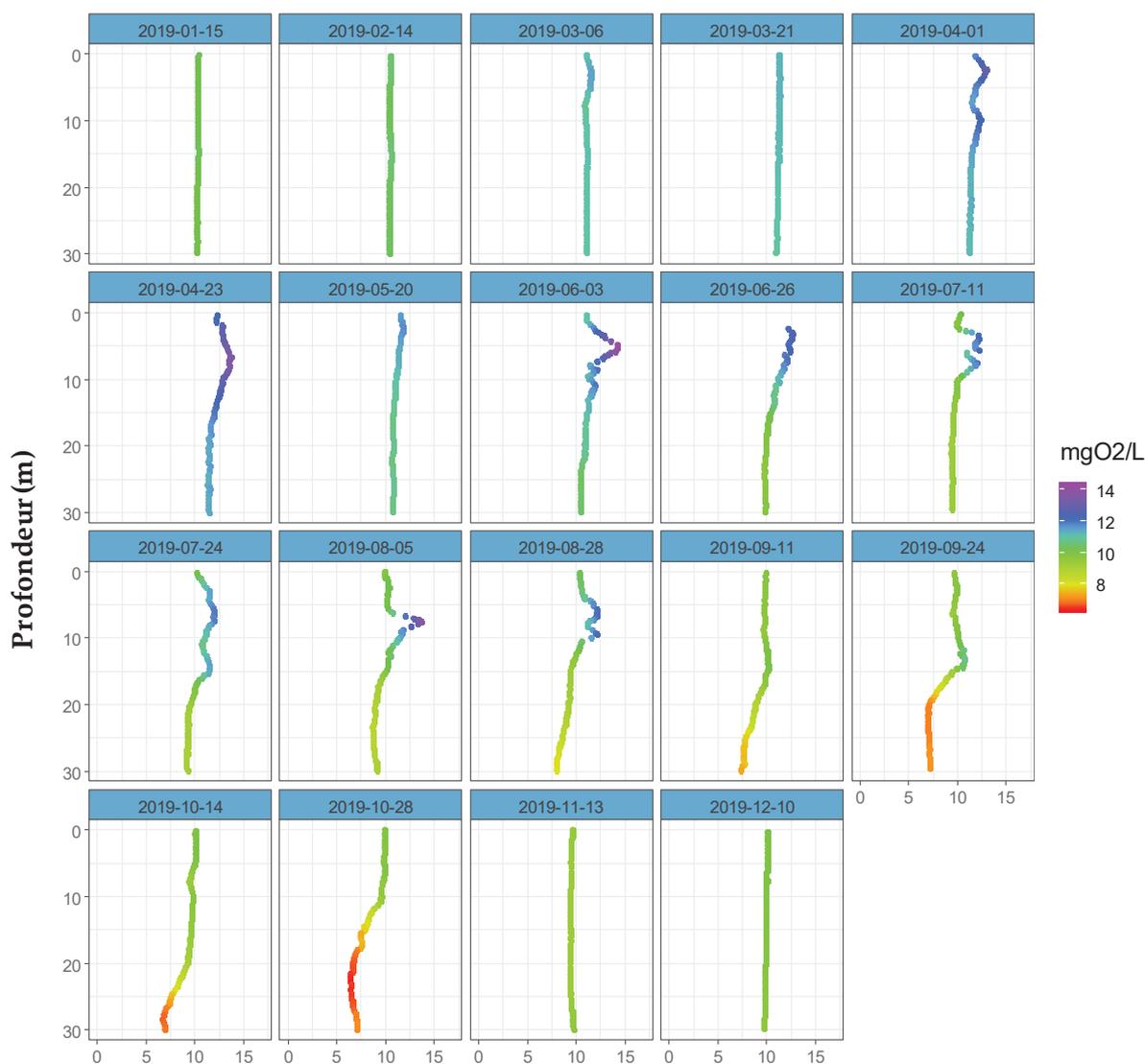
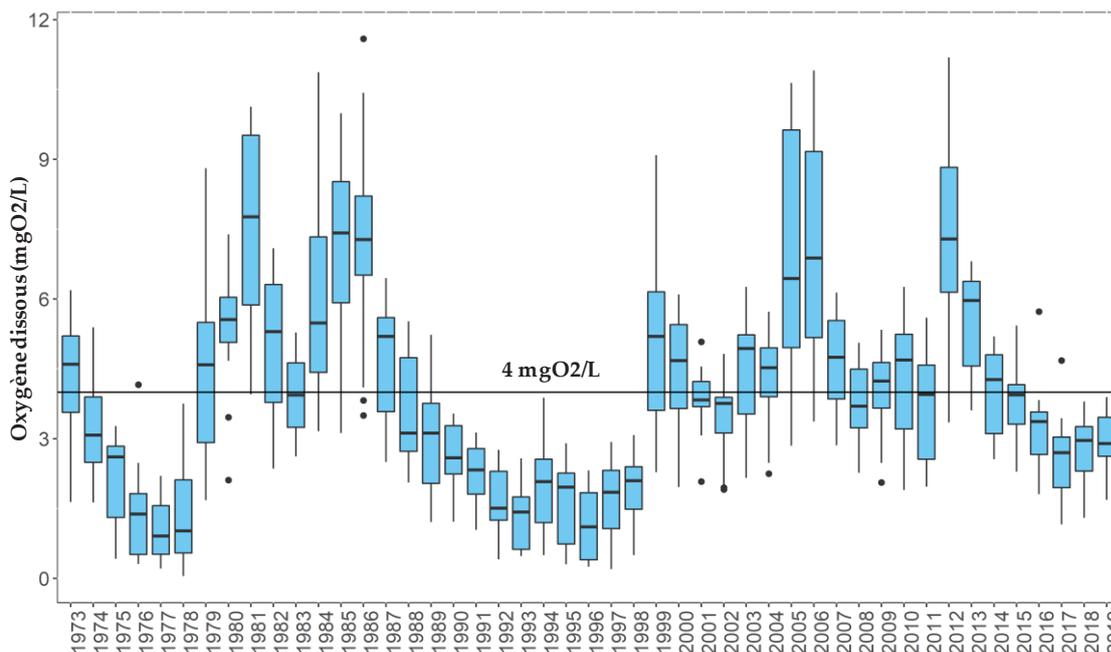


Figure 11 : Concentration en oxygène dissous entre 0 et 30m de la colonne d'eau du lac, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 11 : Concentration of dissolved oxygen between 0 and 30m 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 ; elle doit en outre suffire pour que les animaux moins sensibles, tels que les vers, puissent peupler le fond du lac durant toute l'année et en nombre aussi proche que possible de la densité naturelle. Les conditions naturelles particulières sont réservées".

La figure 12 présente la distribution de concentration en oxygène dissous à 309m. 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 constamment inférieur au seuil de 4mgO₂/L depuis 2016.

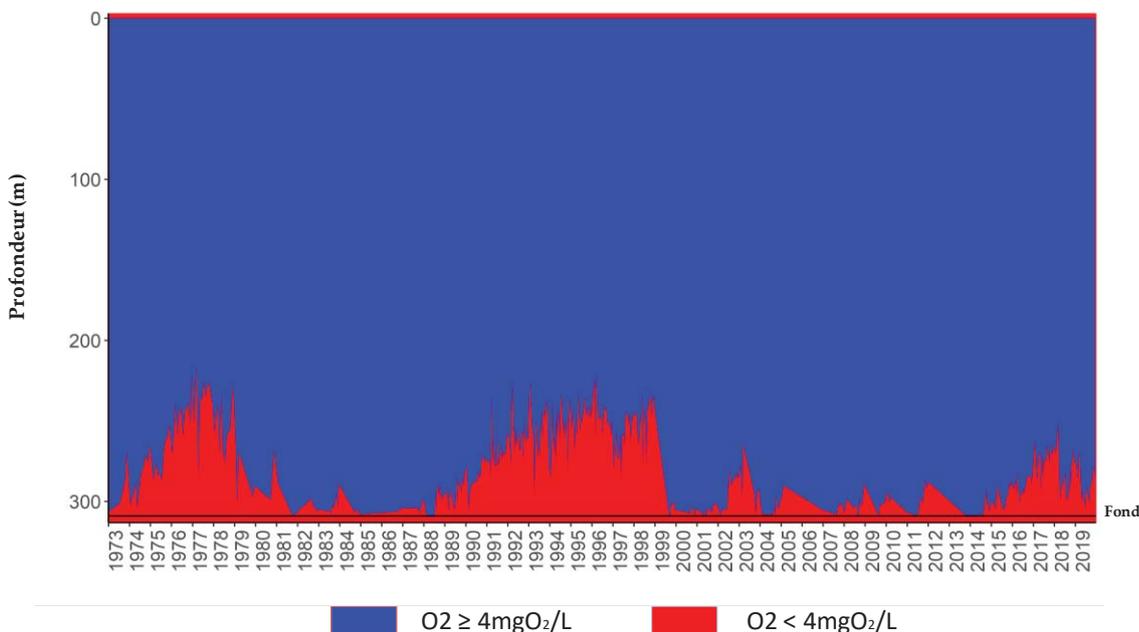


* Mesure de la concentration en oxygène dissous effectuée en laboratoire selon la méthode de Winkler à des profondeurs définies

Figure 12 : Evolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux au fond du lac à 309 m de 1972 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 12 : Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2019, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 13 indique l'évolution de la couche d'eau de concentration inférieure à 4.0 mgO₂/L de 1973 à nos jours. L'épaisseur de la couche d'eau présentant de faibles concentrations en oxygène présente une évolution interannuelle en lien avec les brassages complets du lac. Depuis 2014, la couche appauvrie en oxygène s'étend progressivement pour atteindre les 200m en 2019.



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

Figure 13 : Evolution de la profondeur de la limite à 4 mg d'oxygène dissous par litre de 1973 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 13 : Change in threshold's depth at 4 mg of dissolved oxygen per liter from 1957 to 2019, 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. La figure 28 montre les corrélations de l'oxygène dissous et les différents paramètres : une corrélation négative avec la silice et le phosphore réactif soluble ($r = -0.75$ et -0.78 respectivement ; figure 14). Une diminution de la concentration en oxygène dissous peut engendrer une augmentation en phosphore soluble réactif.

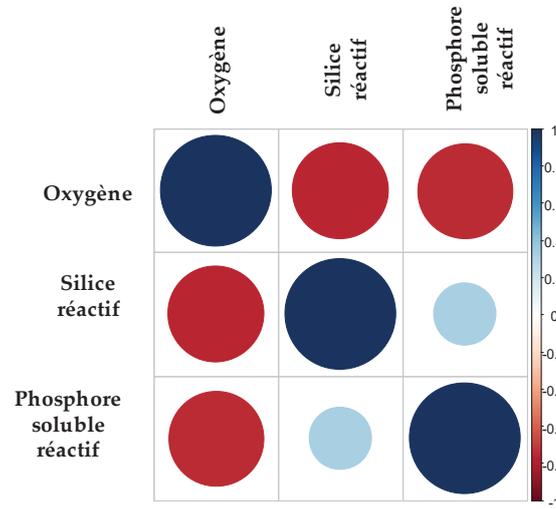


Figure 14 : Corrélation de l'oxygène dissous avec la silice réactive et le phosphore soluble réactif à 309m de 1996 à 2019

Figure 14 : Correlation of dissolved oxygen and reactive silica and soluble reactive phosphorus at 309m from 1996 to 2019

4.4. TITRE ALCALIMÉTRIQUE 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 1.51 et 1.73 meq/L en 2019. Il atteint une valeur maximale dans la colonne d'eau à 1.73 meq/L le 23 avril 2019 pendant le printemps 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 1.51 meq/L. Finalement, le TAC augmente à nouveau dans les couches d'eau de surface à partir du mois d'octobre 2019.

La figure 15 représente la moyenne pondérée du titre alcalimétrique des eaux 0 - 30 m et des eaux du fond (250-309m) de 1981 à 2019. 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), le TAC ne montre pas de tendance long-terme marquée ces dernières années. Dans les couches profondes, l'amplitude de la variation saisonnière du TAC est faible. Il montre une tendance à l'augmentation après chaque brassage complet de la colonne d'eau qui réduit la concentration en TAC dans les couches profondes et réinitialise la tendance d'augmentation du TAC.

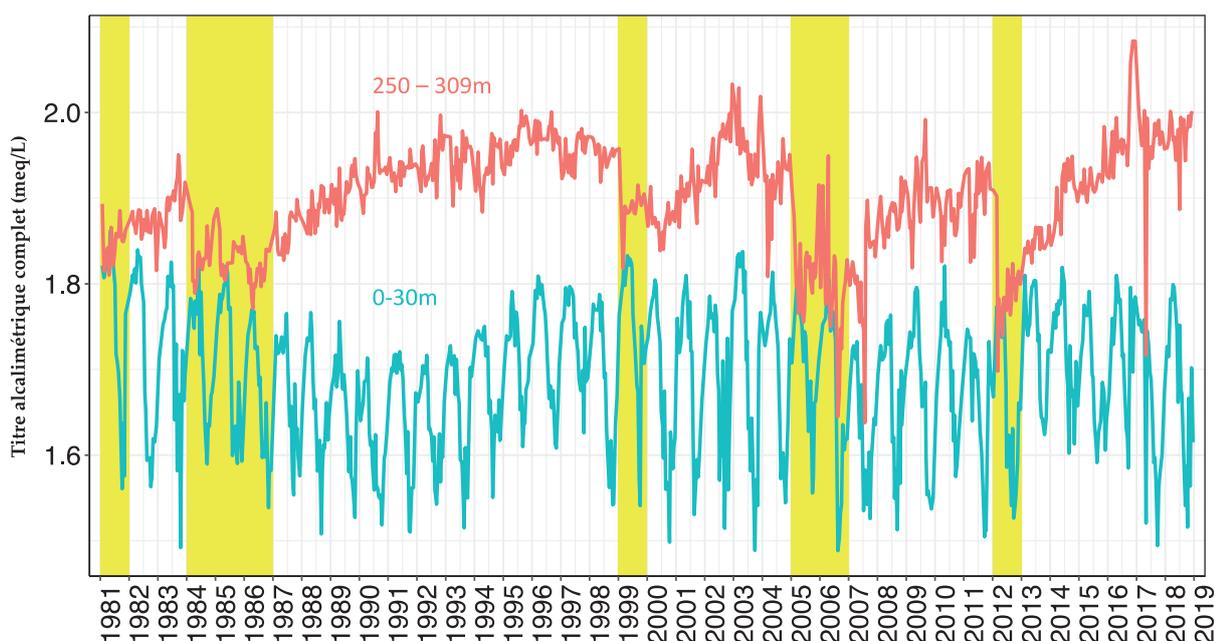


Figure 15 : Titre alcalimétrique complet moyen pondéré dans la couche 0 - 30 m et les couches profondes (250-309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2019. Les barres en jaune représentent les brassages complets.

Figure 15 : Weighted average total alkalinity in the 0-30m layer and bottom layer (250-309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2019. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

4.5. PHOSPHORE TOTAL ET PHOSPHORE SOLUBLE REACTIF

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 2019 n'a pas permis un brassage complet (figure 3), par conséquent les nutriments n'ont pas été redistribués de manière homogène tout le long de la colonne d'eau (figure 16).

La figure 16 représente la moyenne pondérée du phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) de la couche 0 - 30 m et des eaux profondes (250-309m) de 1981 à 2019. Dans la couche 0-30m, l'amplitude de la variabilité saisonnière du phosphore réactif soluble est plus importante avant les années 90. Cette amplitude diminue nettement au cours du temps et atteint une concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore réactif soluble de 2.78 $\mu\text{gP/L}$ dans la couche 0-30m en 2019, soit 1.84 $\mu\text{gP/L}$ inférieure à l'année 2018 et 1.04 $\mu\text{gP/L}$ inférieure à l'année 2017.

Dans les couches profondes (250-309m), la concentration en phosphore réactif soluble 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 phosphore soluble réactif mesurée dans les couches profondes. Depuis 2018, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore soluble réactif présente une légère baisse depuis 2018. En 2019, elle était de 34.92 $\mu\text{gP/L}$, soit une diminution de 4.10 $\mu\text{gP/L}$ par rapport à l'année 2018. 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. Les raisons de cette baisse restent à déterminer mais sont probablement liées à des processus hydrologiques ou chimiques, voire biochimiques.

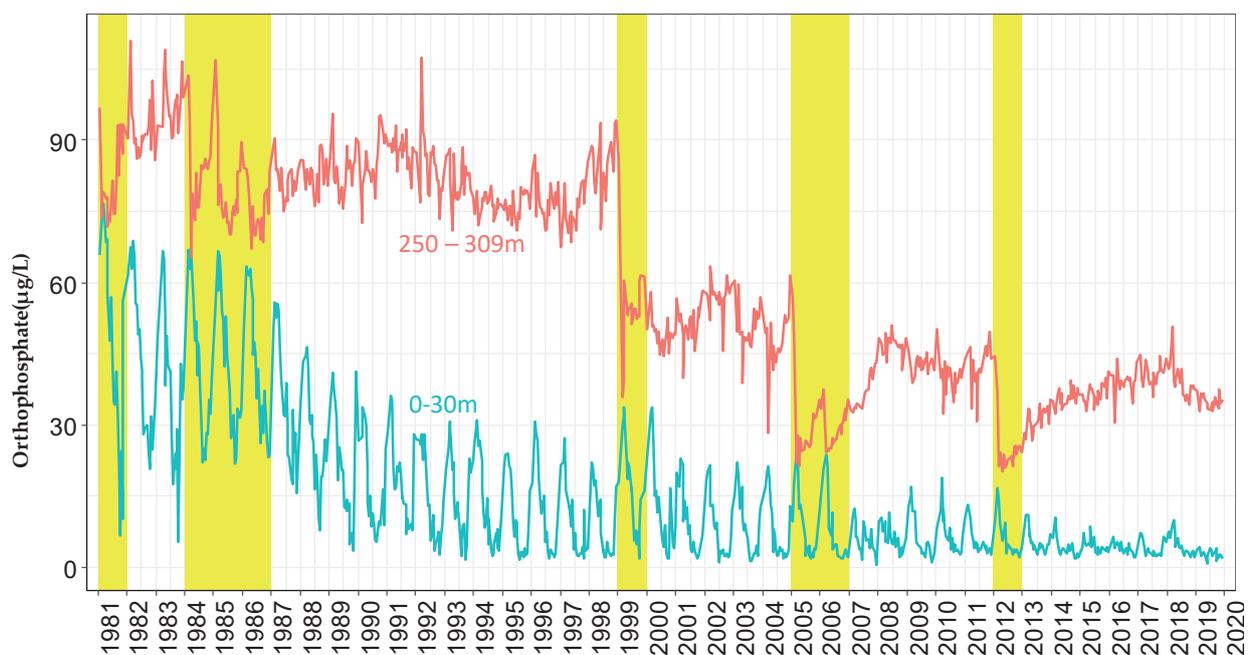


Figure 16 : Concentration moyenne pondérée en phosphore réactif soluble ($P-PO_4^{3-}$) dans la couche 0 - 30 m et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2019. Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 16 : Concentration of soluble reactive phosphorus ($P-PO_4^{3-}$) in the 0-30m layer and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2019. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

La figure 17 représente la moyenne pondérée du phosphore total (P_{tot}) dans la couche 0 - 30 m, et des eaux profondes (250-309m) de 1981 à 2019.

La même observation que le phosphore soluble réactif 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 à 3 temps comme décrite précédemment. La concentration annuelle moyenne pondérée en phosphore total 0-30m en 2019 est de 9.44 $\mu\text{gP/L}$, soit une diminution de 2.46 $\mu\text{gP/L}$ et de 0.19 $\mu\text{gP/L}$ par rapport à l'année 2018 et 2017. La concentration en phosphore total dans les couches profondes est de 38.32 $\mu\text{gP/L}$, soit une diminution de 7.89 $\mu\text{gP/L}$ et de 4.38 $\mu\text{gP/L}$ par rapport à l'année 2018 et 2017.

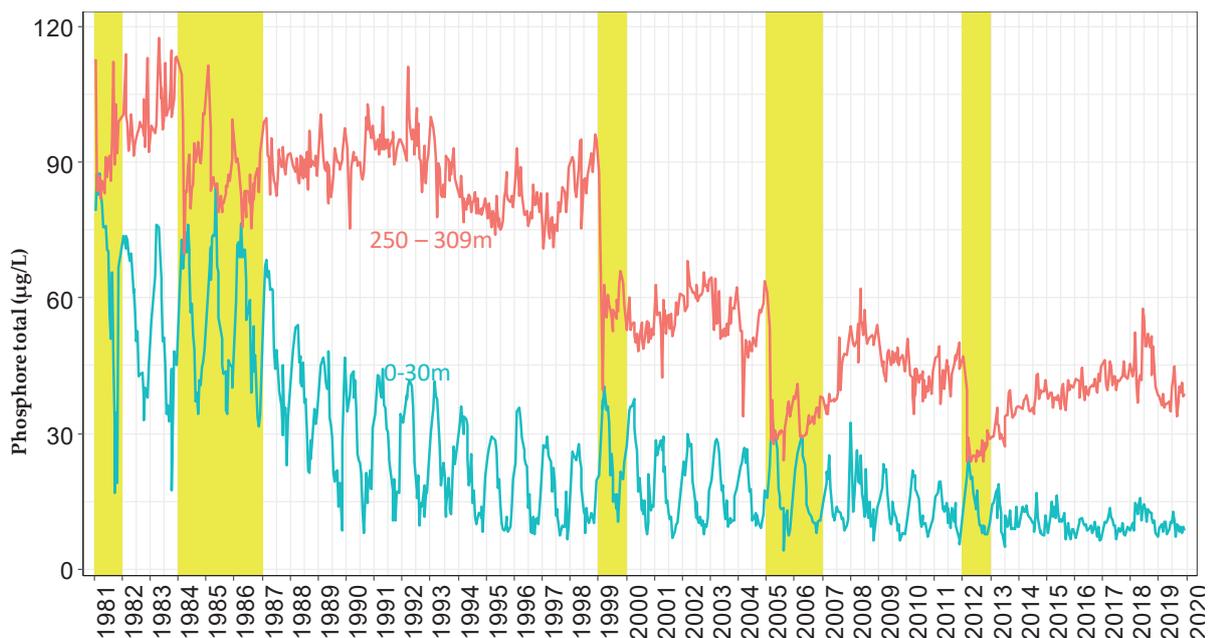


Figure 17 : Concentration moyenne pondérée en phosphore totale (P_{tot}) dans la couche 0 - 30 m et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2019. Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 17 : Concentration of total phosphorus (P_{tot}) in the 0-30m layers and bottom layers (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2019. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

La figure 18 représente l'évolution depuis 1996 de la concentration moyenne pondérée en phosphore total et en phosphore réactif soluble dans la couche 0 - 30 m lors du brassage hivernal.

La concentration en phosphore réactif soluble, directement bio-disponible, diminue progressivement au cours des années. Elle est de 4.21 µgP/L, soit une diminution de 4.81 µgP/L et de 1.75 µgP/L par rapport à l'année 2018 et 2017. Cette concentration est du même ordre de grandeur que l'année 2016.

On constate une tendance globale à la baisse de la concentration en phosphore total sur cette chronique depuis 1996. Ce phénomène s'explique aisément par la diminution des apports au Léman liée à l'interdiction d'utiliser des phosphates dans les lessives en Suisse depuis 1986 puis en France à partir de 2007 ainsi qu'à l'augmentation des performances en matière de déphosphatation des STEP. En 2019, la concentration en phosphore total lors du brassage est de 9.88 µgP/L, soit une diminution de 4.69 µgP/L et de 1.02 µgP/L par rapport à l'année 2018 et 2017.

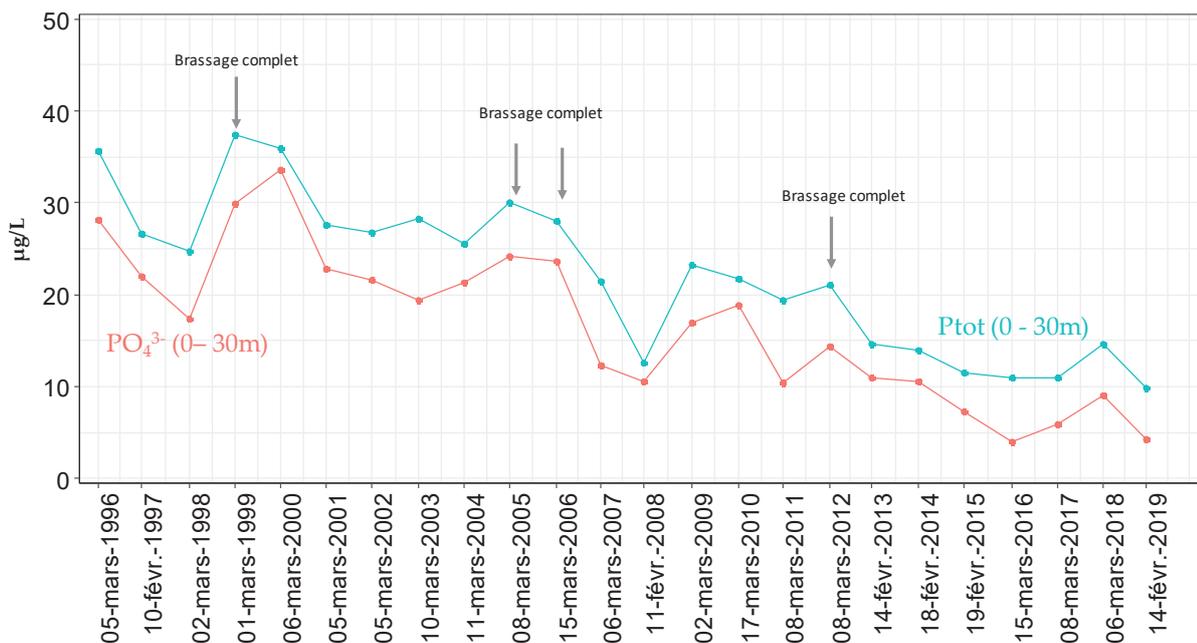


Figure 18 : Concentration moyenne pondérée en phosphore réactif soluble (P-PO₄³⁻) et phosphore total dans les eaux de la couche 0 - 30 m de 1996 à 2019 à l'issue du brassage hivernal, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 18 : Weighted average concentration of soluble reactive phosphorus(P-PO₄³⁻) and total phosphorus in the lake's water surface layer of 0 - 30m from 1996 to 2019 after winter mixing, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

4.6. AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMMONIACAL

A l'issue du brassage hivernal, la concentration moyenne en azote nitrique, mesurée sur les 30 premiers mètres, est de 564 µgN/L, soit inférieure à la concentration de 582µgN/L mesurée en 2018 (figure 19). Elle atteint un maximum de 567 µgN/L le 21 mars 2019, soit du même ordre de grandeur par rapport à l'année 2018. La concentration en azote nitrique des couches de 0 à 10 m diminue significativement dès la campagne suivant le brassage hivernal (figure 19). 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 242 µgN/L le 28 août 2019. 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 462µgN/L en décembre 2019.

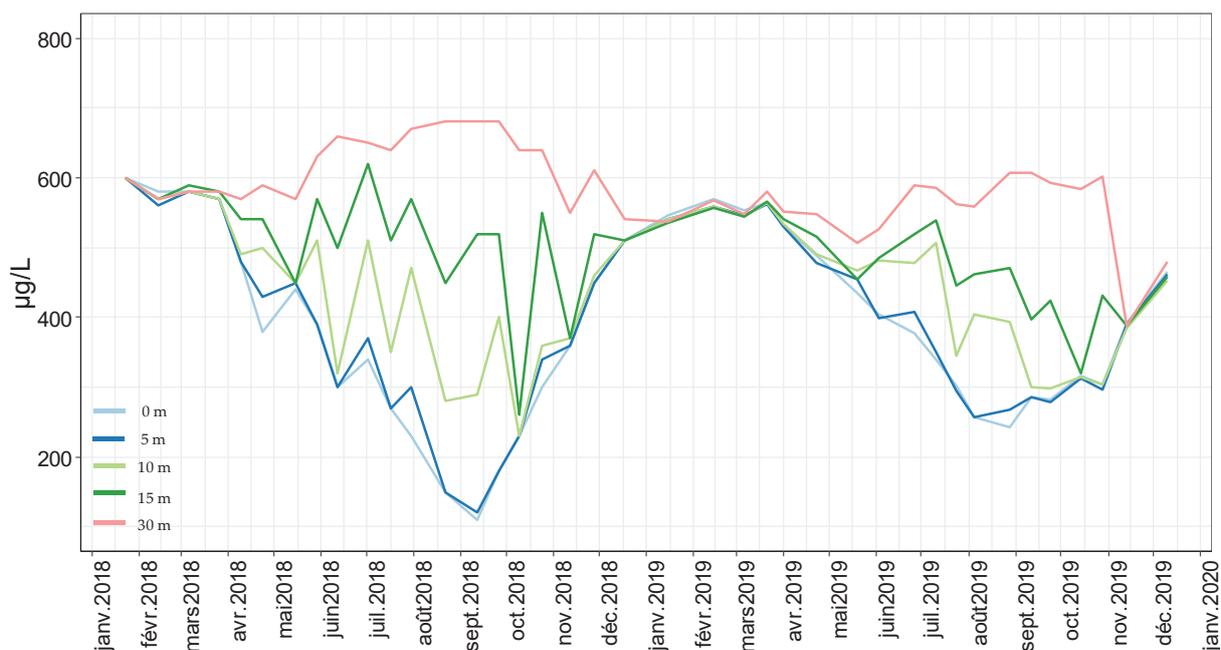


Figure 19 : Concentration en azote nitrique (N-NO₃⁻) dans l'eau des couches superficielles du lac (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 19 : Concentration of nitrate (N-NO₃⁻) in lake's water surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

La figure 20 représente l'évolution de la concentration moyenne pondérée d'azote total et d'azote nitrique dans la couche 0 - 30 m lors du brassage hivernal de 1996 à 2019. On observe une relative stabilité de la teneur d'azote sur cette chronique. La concentration d'azote total et d'azote nitrique au 14 février 2019 sont respectivement de 697 $\mu\text{gN/L}$ et 564 $\mu\text{gN/L}$ respectivement, soit une légère augmentation par rapport à 2018 pour l'azote total et une légère diminution pour l'azote nitrique.

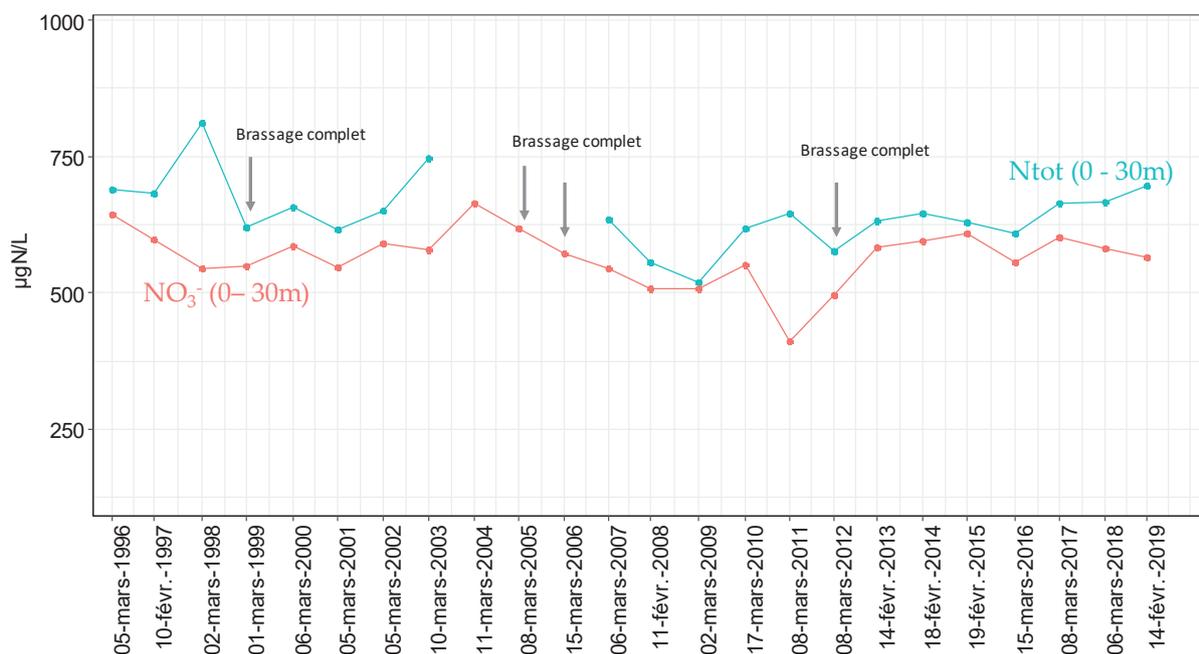


Figure 20 : Concentration moyenne pondérée en azote nitrique (NO₃⁻) et azote total dans les eaux de la couche 0 - 30 m de 1996 à 2019 à l'issue du brassage hivernal, Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 20 : Weighted average concentration of nitrate(NO₃⁻) and total nitrogen in the 0-30m layer from 1996 to 2019 after winter mixing, 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 2020, ce rapport). Cette activité conduit à une concentration en azote ammoniacal inférieure à celle de l'année 2018 sur la période de mai à juillet 2019. En 2019, la valeur maximale était de 52 µgN/L à 5 m le 24 juillet 2019 (figure 21). Ceci est à corrélérer avec une activité zooplanctonique importante liée à l'importance de la biomasse phytoplanctonique à cette période (RIMET 2020, ce rapport)

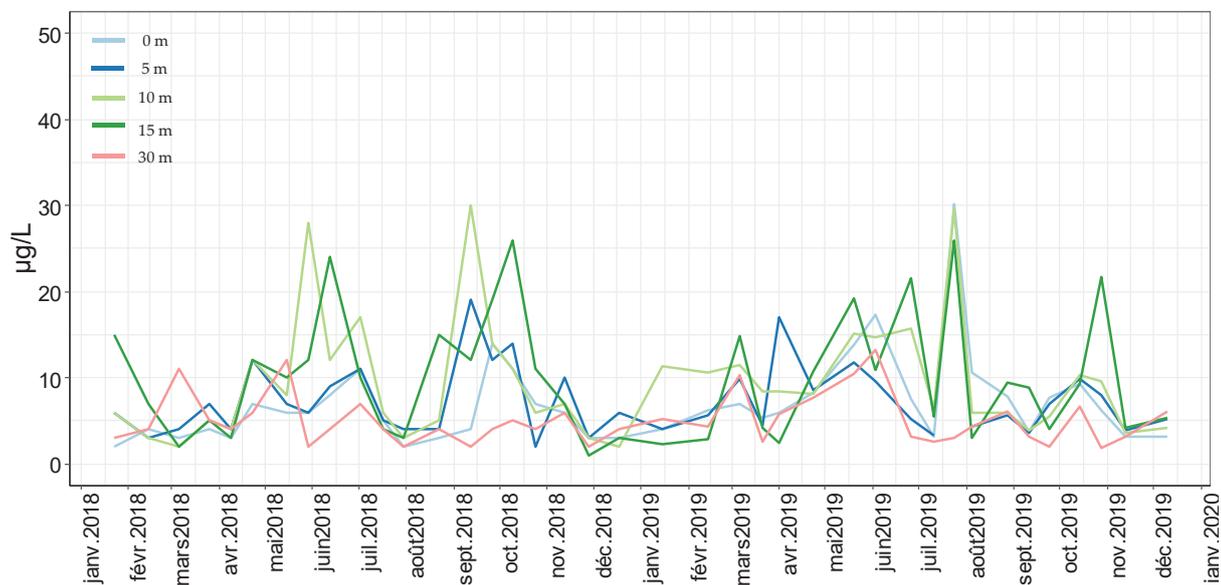


Figure 21 : Concentration en azote ammoniacal (N-NH₄⁺) dans l'eau des couches superficielles (0, 5, 10, 15 et 20 m), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 21 : Concentration of ammoniacal nitrogen in lake's surface layers (0, 5, 10, 15 and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

4.7. SILICE

Pour les couches d'eau superficielles entre 0 et 30m, la plus forte concentration en silice est de 1.11 mgSiO₂/L à l'issue du brassage hivernal le 14 février 2019. La concentration moyenne annuelle en 2019 est de 0.59 mgSiO₂/L, soit inférieure de 0.36 mgSiO₂/L par rapport à l'année 2018. Cet enrichissement constitue une source nutritive importante pour les diatomées (RIMET 2020, ce rapport). La concentration en silice diminue progressivement au cours du printemps pour atteindre une valeur de 0.37 mgSiO₂/L le 26 juin 2019. Les concentrations en silice demeurent faibles entre juin et octobre 2019. La concentration minimale de 0.33 mgSiO₂/L est atteinte le 05 août 2019. A partir du mois de novembre 2019, la consommation décroissante du phytoplancton et l'enfoncement de la thermocline qui s'accompagne d'une remobilisation des concentrations en silice du métalimnion, entraînent une nouvelle hausse des teneurs en silice en surface du lac (Figure 22).

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 22). La concentration en silice diminue nettement dans les couches profondes après chaque brassage complet.

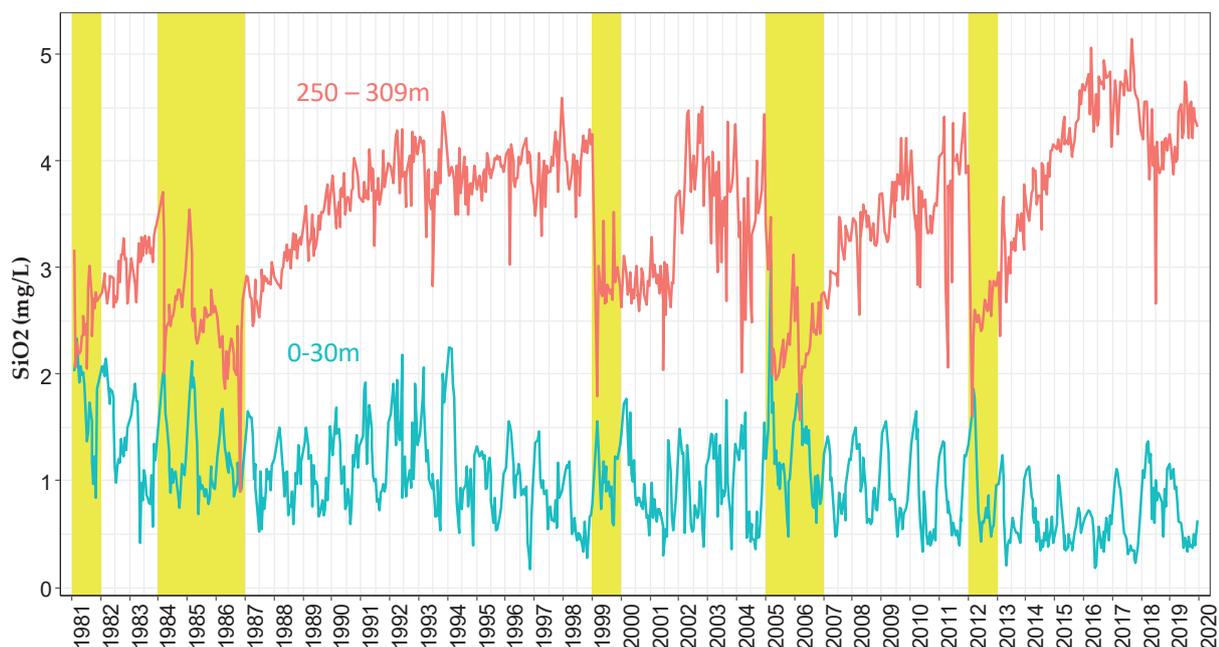


Figure 22 : Concentration moyenne pondérée en silice (SiO₂) dans la couche (0 - 30 m et les couches profondes (250 - 309m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2019. Les barres en jaune représentent les brassages complets

Figure 22 : Concentration of silica (SiO₂) in the 0-30m layer and bottom layer (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2019. The yellow shades represent the complete turnover during winter.

4.8. TRANSPARENCE

La dynamique de transparence pour l'année 2019 est représentée sur la figure 23. L'hiver 2019 entraîne une transparence importante jusqu'à 15.7m le 14 février 2019 soit supérieur à l'année précédente avec 13.2m le 06 mars 2018.

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 5.1m le 23 avril 2019. La transparence varie entre 5.1 et 7.2 m de mai à juin 2019 pendant la phase où le phytoplancton printanier est le plus abondant et essentiellement constitué de Diatomées, Chlorophycées, Chrysophycées et Zygothécées (RIMET 2020, ce rapport).

La transparence diminuera de nouveau les semaines suivant l'apparition du deuxième pic de biomasse phytoplanctonique, qui s'étend de mi-août et à mi-septembre 2019, avec des valeurs du même ordre de grandeur que celles observées lors de la phase printanière.

Enfin, sur la dernière partie de l'année, la transparence augmente progressivement et atteint 7.4 m le 10 décembre 2019.

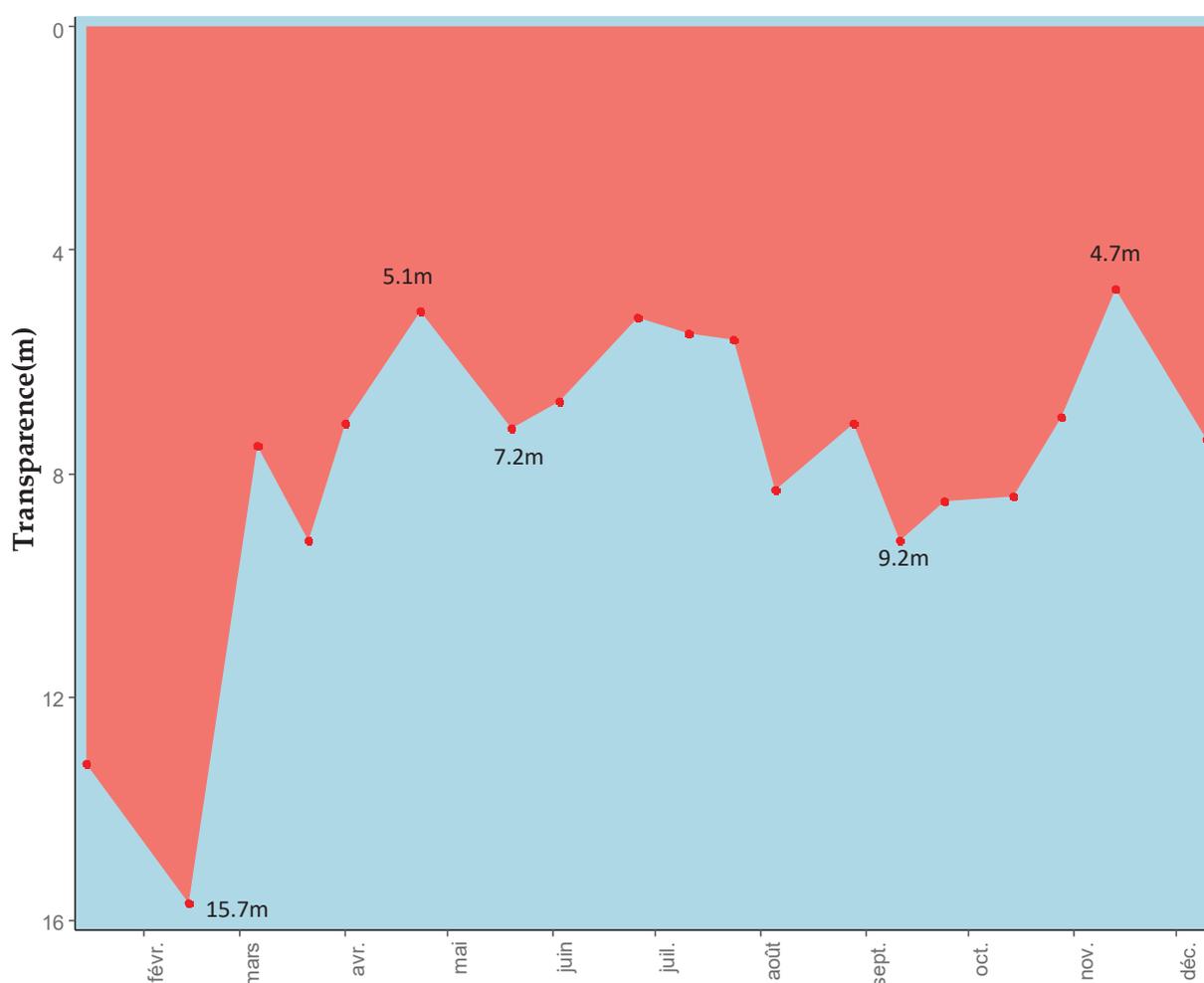


Figure 23 : Transparence avec le disque de Secchi (noir et blanc, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 23 : Transparency using a Secchi disk (black and white, 20 cm), Léman - Grand Lac (SHL2)

La figure 24 permet d'observer l'évolution des dates de reprises printanières de l'activité phytoplanctonique et la période où la transparence est de nouveau importante, ce qui correspond souvent à la phase des eaux claires durant les 20 dernières années (1997 à 2019). La phase des eaux claires apparaît plus nettement en 2019 avec une reprise de l'activité phytoplanctonique printanière vers mi-avril et la croissance printanière s'étend jusqu'à la troisième semaine du mois de mai 2019.

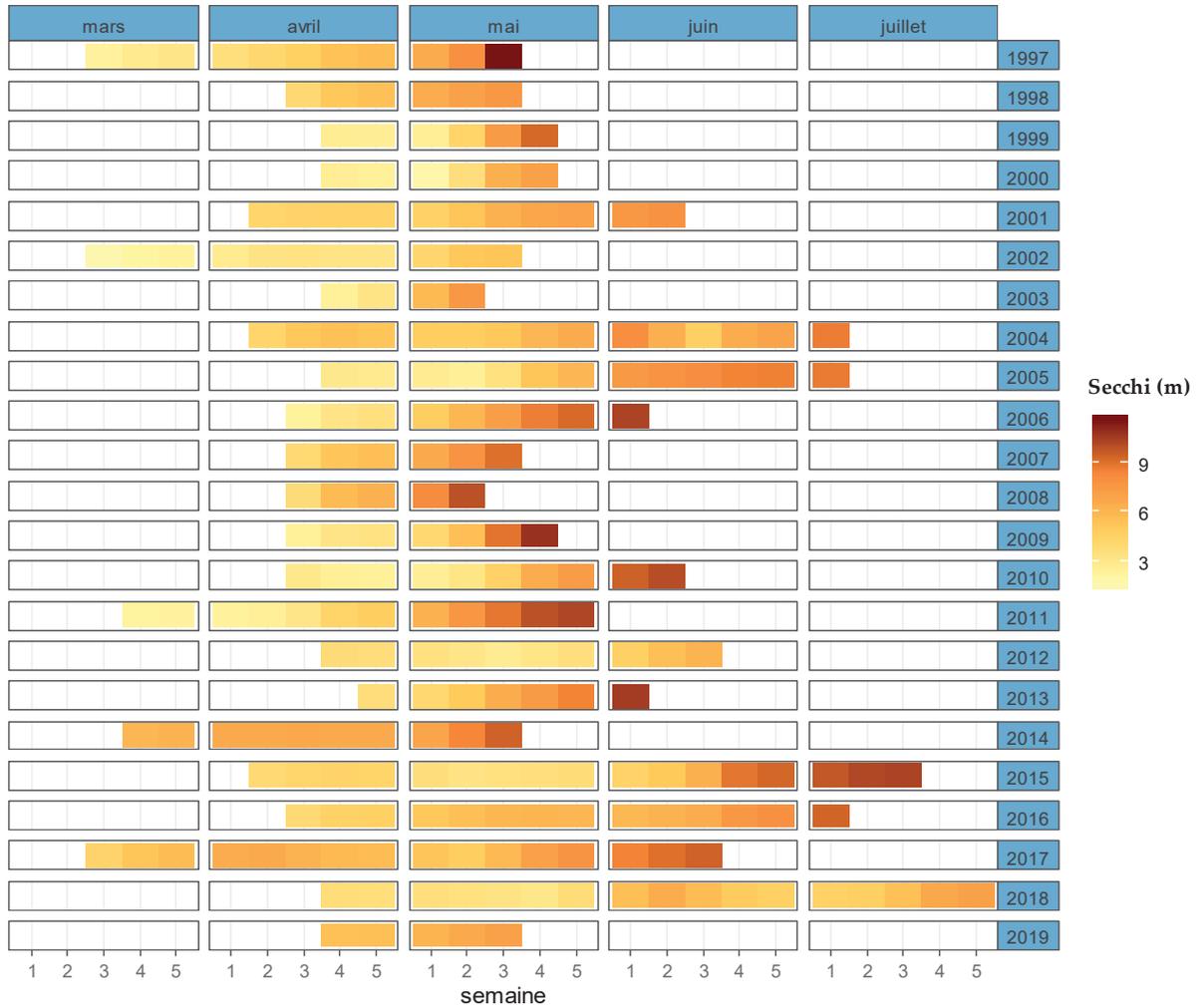


Figure 24 : Evolution de la transparence de l'eau du début de la reprise de l'activité phytoplanctonique à l'été de 1997 à 2019, Léman –Grand Lac (SHL2)

Figure 24 : Evolution of water transparency from the beginning of the recovery of phytoplankton activity to summer from 1999 to 2017, Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

4.9. 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 s'étend de début d'avril à fin juin 2019 avec une valeur maximale de 413 $\mu\text{gC/L}$ à 10m, soit inférieure à la valeur maximale de 558 $\mu\text{gC/L}$ observée à 0m en 2018 (figure 25). Le deuxième pic le plus marqué de carbone organique particulaire s'étend de mi-juillet à mi-septembre, et est signalé par un maximum le 24 juillet 2019, avec 475 $\mu\text{gC/L}$. Pour l'année 2019, les deux pics de carbone organique particulaire (COP) observés correspondent aux périodes où la biomasse phytoplanctonique est importante (RIMET 2020, ce rapport).

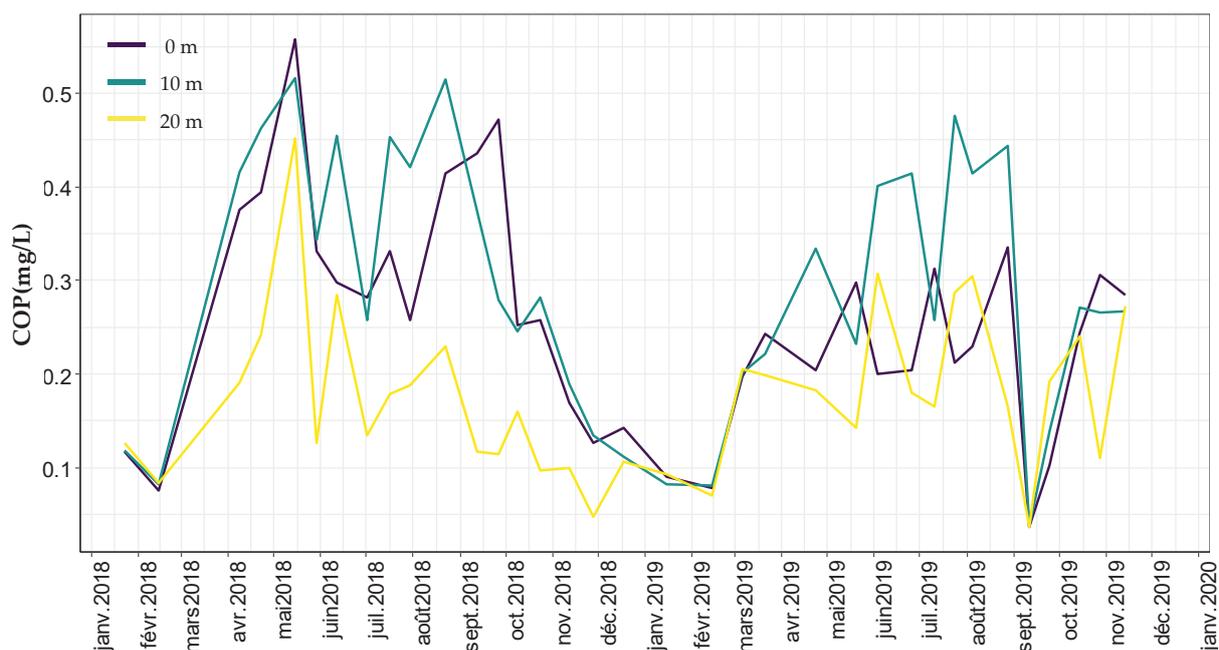


Figure 25 : Concentration en carbone organique particulaire dans l'eau des couches de 0, 10 et 20 m, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 25 : Concentration of particulate organic carbon in lake's water surface layers (0, 10, and 20 m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Les figures 26 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 sont du même ordre de grandeur que l'année 2018. Le phosphore particulaire est plus faible que l'année 2018 et du même ordre de grandeur que les années 2016 et 2017.

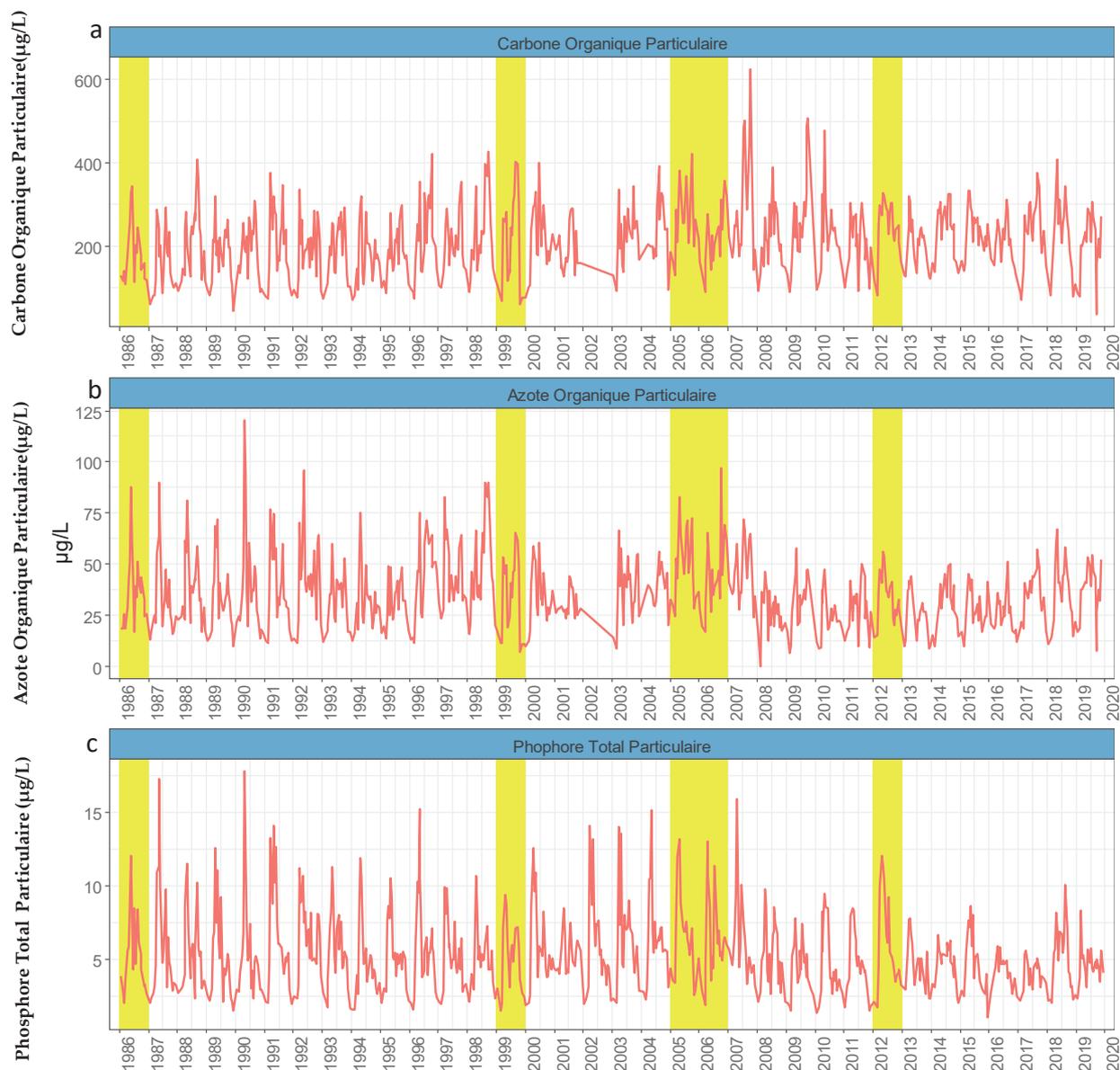


Figure 26 : Evolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche 0 - 20 m de 1986 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2) :

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

Figure 26 : Change in the concentration of particulate matter in the 0-20m layer from 1986 to 2019, 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 27 décrit le rapport N/P entre 1986 et 2019 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 2019 indique une carence en phosphore. Elle est plus importante qu'en 2018. Ceci peut s'expliquer par la diminution des concentrations en phosphore total et phosphore réactif soluble par rapport à l'année 2018.

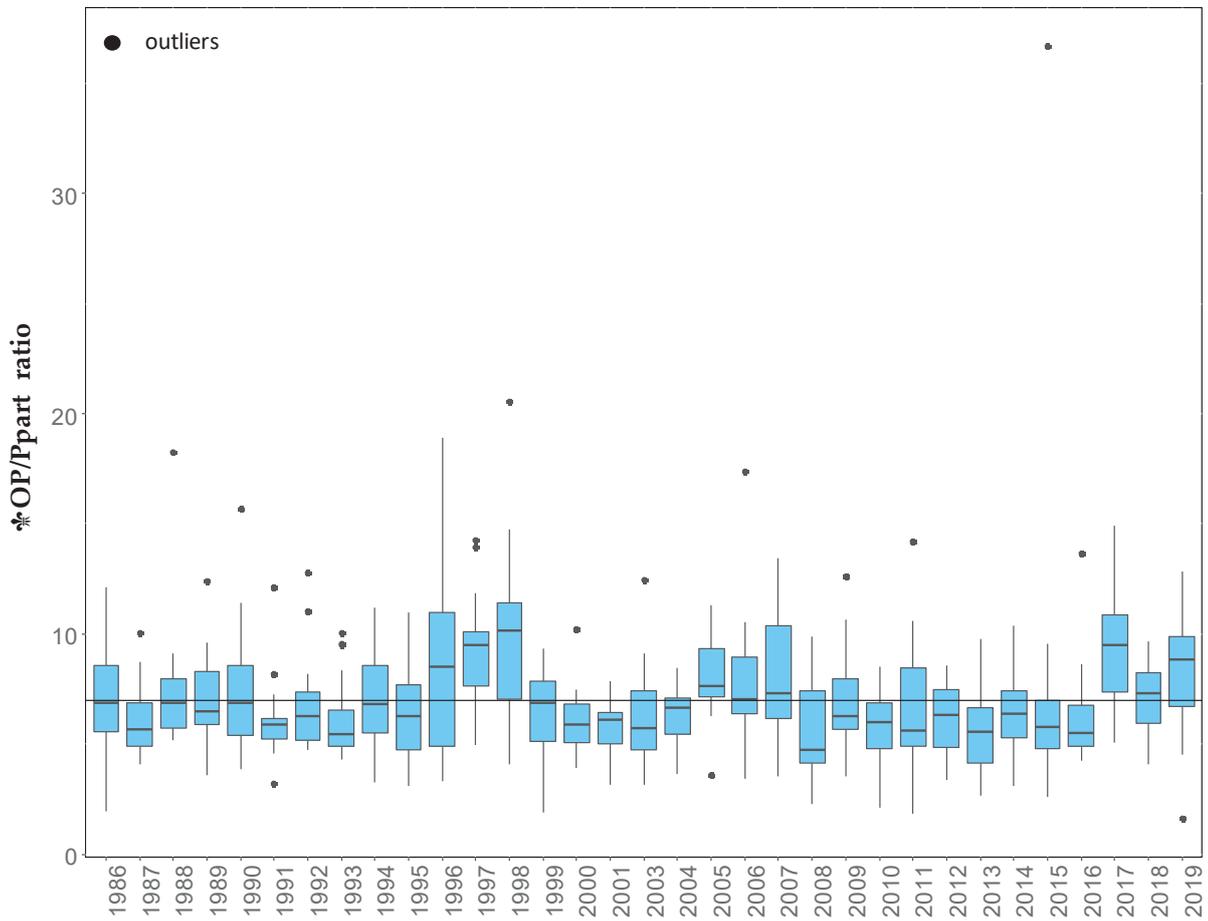


Figure 27 : Evolution du rapport NOP / Ppart dans l'eau de la couche (0 - 20 m de 1986 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 27 : Change in PON / Ppart ratio in the 0-20m layer from 1986 to 2019, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5. ÉVOLUTION INTERANNUELLE DES PRINCIPAUX PARAMETRES PONDERES SUR L'ENSEMBLE DU LAC

5.1. PHOSPHORE REACTIF SOLUBLE ET PHOSPHORE TOTAL

En 2019, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total est de 16.20 µgP/L, soit une diminution de 3.20 µgP/L et de 1.55 µgP/L par rapport aux années 2018 et 2017 (figure 28). Le phosphore total s'approche de l'objectif de la CIPEL pour l'année 2020 qui prévoit une concentration en phosphore total entre 10 et 15 µgP/L.

La concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore soluble réactif est de 11.91 µgP/L en 2019, soit une diminution de 2.58 µgP/L par rapport à l'année 2018.

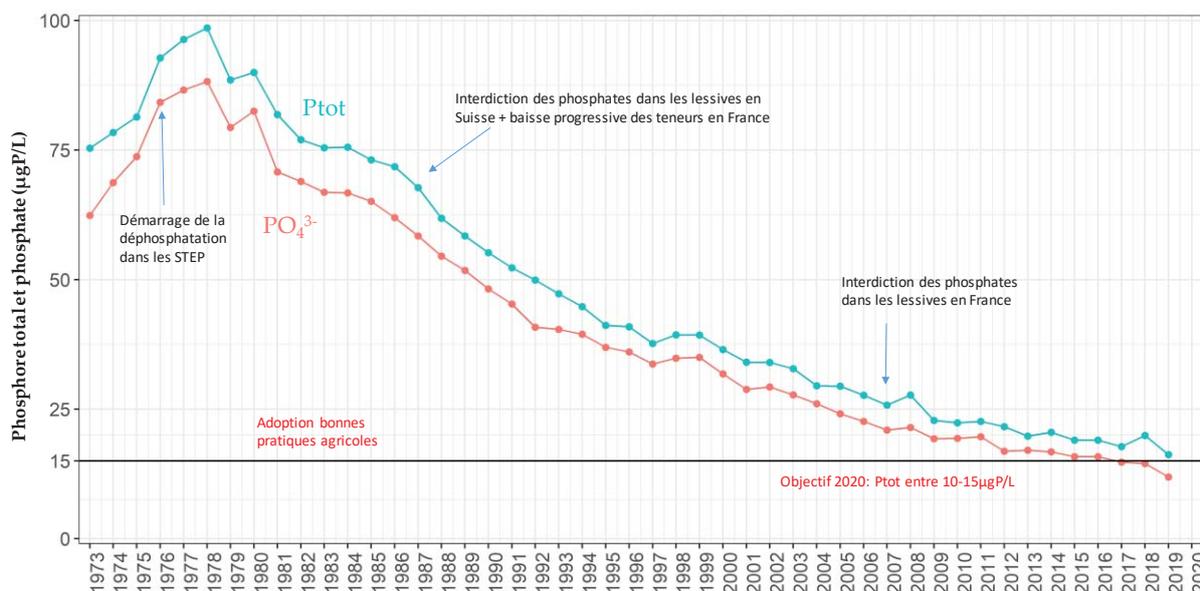


Figure 28 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée de phosphore réactif soluble et de phosphore total pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 28 : Change in weighted mean annual total concentration and stock of soluble reactive phosphorus and total phosphorus in the entire mass of lake's water from 1973 to 2019, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.2. AZOTE NITRIQUE ET AZOTE TOTAL

En 2019, la concentration moyenne en azote total diminue par rapport à l'année 2018 et revient au même niveau de concentration que celle mesurée en 2017. La concentration moyenne en azote total est de $667\mu\text{gN/L}$.

La concentration moyenne annuelle en azote nitrique, quant à elle, continue à diminuer et est égale à $542\mu\text{gN/L}$ (figure 29). La teneur maximale en nitrate dans les eaux du Léman est de 0.62mgN/L , soit $2.75\text{mgNO}_3^-/\text{L}$. Cette concentration reste très inférieure et donc conforme aux normes pour l'eau de consommation en Suisse, qui édicte une valeur de tolérance de $40\text{mgNO}_3^-/\text{L}$ ainsi qu'en France, avec une limite de qualité de $50\text{mgNO}_3^-/\text{L}$.

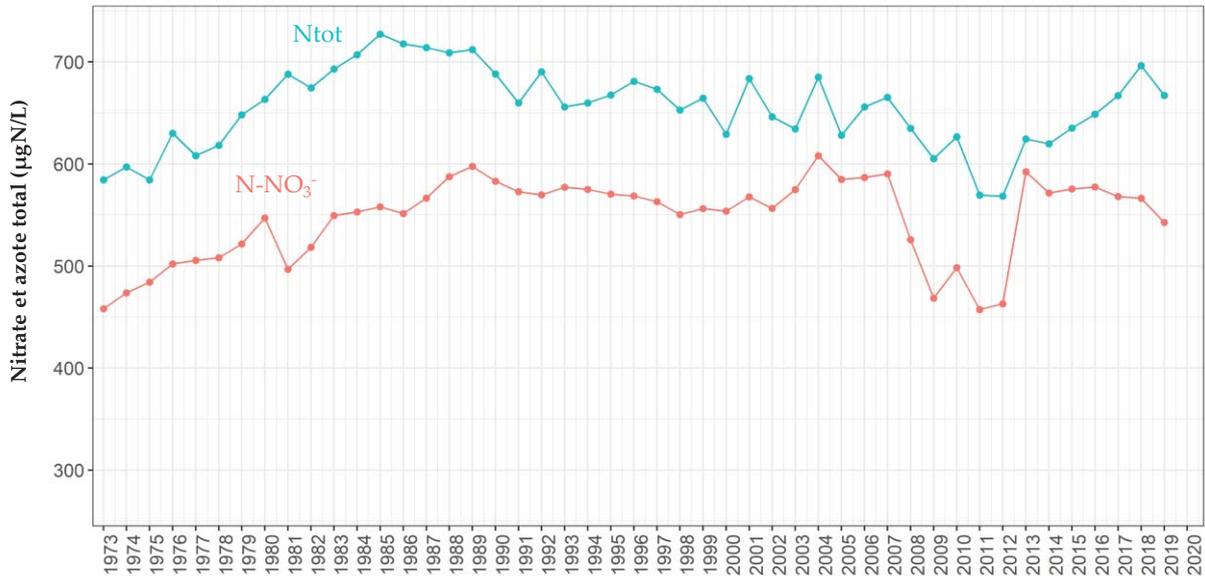


Figure 29 : Evolution de la concentration moyenne annuelle pondérée d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2017, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 29 : Change in the weighted mean annual total concentration of total nitrogen and nitrate in the entire mass of lake's water from 1973 to 2017, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

5.3. CHLORURE

La concentration des ions chlorures dans le Léman était en constante augmentation de 1973 à 2016 et semble s'être stabilisé depuis 2016 (figure 30). En 2019, le stock de chlorure est égal à 903'380 tonnes, soit une moyenne annuelle pondérée qui atteint 10.50 mgCl⁻/L contre 891'953 tonnes et 10.37 mgCl⁻/L en 2018. Les ions chlorure peuvent provenir des différentes sources : des 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.

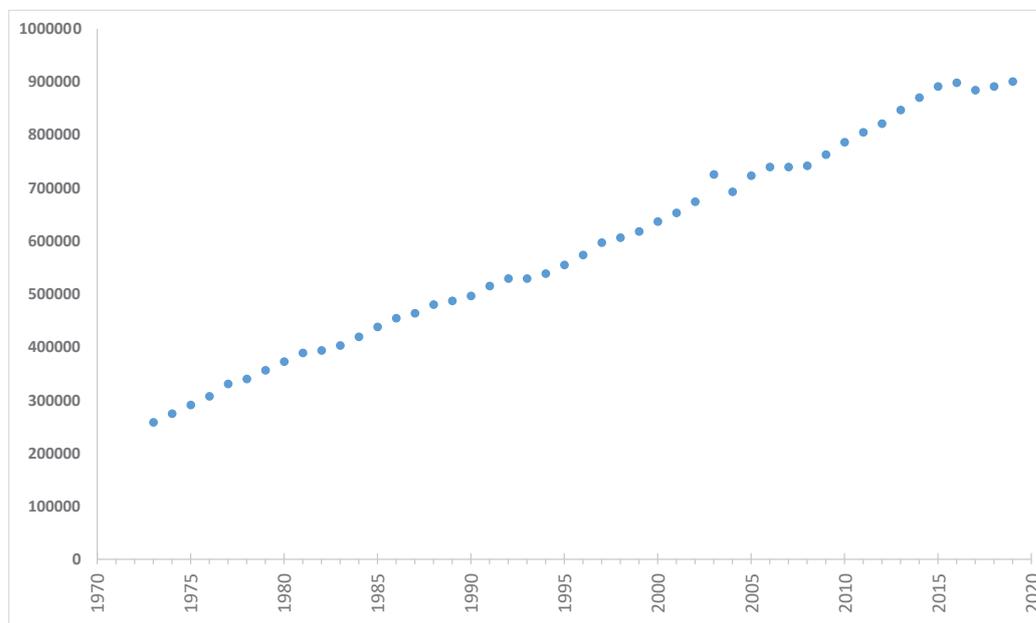


Figure 30 : Evolution du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 30 : Change in the stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1973 to 2019, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

6. CONCLUSION

L'année 2019 est la troisième année la plus chaude depuis 1980, derrière 2018 et 1994 et au même rang que 2011. La température moyenne de la couche 0-10m montre que les températures sont plus élevées pour les mois d'hiver et d'automne.

Les faits marquants de l'évolution physico-chimique des eaux du Léman en 2019 sont les suivants :

- L'hiver 2019 n'a pas permis un brassage complet de la colonne d'eau. La profondeur du brassage hivernal est observée à 135 m. Par conséquent, le brassage partiel réduit la réoxygénation des couches d'eau profondes du Léman et la redistribution des nutriments dans l'ensemble de la colonne d'eau.
- La température de l'eau à 309 continue d'augmenter depuis le dernier brassage hivernal complet en 2012. Entre 2012 et 2019, la température à 309m a augmenté de 0.73 °C.
- La concentration moyenne en phosphore total reprend sa tendance à la baisse après une augmentation particulière en 2018. Le phosphore total s'approche de l'objectif défini par la CIPEL pour la période 2011-2020 d'une concentration en phosphore total entre 10 et 15 µgP/L.

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.
- RASCONI, S., ANNEVILLE, O., LAINE, L. (2020) : Zooplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2019.
- TRAN KHAC, V., QUETIN, P. et ANNEVILLE, O. (2020) : Evolution physico-chimique des eaux du Léman (éléments majeurs) et données météorologiques. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2019.
- 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.
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- RASCONI, S., ANNEVILLE O., RIMET F., PERNEY, P. (2020) : Biomasse chlorophyllienne et production primaire dans le Léman, Comm. int. prot. Eaux Léman contre pollut. Campagne 2019,
- RAMSEIER GENTILE, S., EDDER, P., KLEIN, A. et LODS-CROZET, B. (2015) : Métaux et micropolluants organiques dans les eaux, les moules et les truites lacustres du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2014, 84-97.
- RIMET, F. (2020) Phytoplancton du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2019.
- SOERE OLA-IS, AnaEE-France, INRAE Thonon-les-Bains, CIPEL [10/02/2018], 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.

7. ANNEXES

Annexe 1

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 1 : Volume des strates des couches d'eau

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

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

Annexe 2

Tableau 3 : Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2019, 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 2019, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). Calculation based on database extracted from, SOERE OLA-IS according to ponderation coefficient in Annexe I

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

b : valeurs interpolées

Annexe 3

Tableau 4 : Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2019, Léman - Grand Lac (SHL2)

Tableau 4 : Annual total content in metric tons from 1957 to 2019, 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

b : valeurs interpolées

Annexe 4

Tableau 2 : 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
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 5

MÉTÉOROLOGIE

1. INTRODUCTION

En 2019, à l'exception du mois de mai qui fut relativement frais (-2.1 °C par rapport à la normale) l'ensemble des températures mensuelles furent supérieures aux normales. (figure 1).

Les mesures relevées à Thonon sont en moyenne plus chaudes que celles mesurées dans les autres stations (Tableau 1)

Tableau 1: Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2019 (°C).

Table 1: Mean monthly air temperature for each station in 2019 (°C).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	1.8	1.5	2.0	2.8	2.1
Février	3.9	4.2	4.8	4.5	2.8
Mars	8.2	7.8	8.0	8.0	6.4
Avril	10.3	9.8	10.2	10.2	9.8
Mai	12.4	12.0	11.9	12.3	14.2
Juin	19.9	19.4	19.8	19.8	17.7
Juillet	22.6	22.1	22.3	22.5	20.2
Août	20.6	20.0	20.5	21.0	19.7
Septembre	17.2	16.8	14.7	17.5	15.7
Octobre	13.2	12.7	13.3	13.6	11.4
Novembre	6.3	6.1	7.1	7.5	6.0
Décembre	4.9	4.7	5.6	5.9	3.1
Moyenne annuelle	11.8	11.4	11.9	12.1	10.8

En 2019, la température moyenne annuelle inter-stations est de 11.8 °C. Avec cette température, l'année 2019 se classe comme 2011 au troisième rang ; (l'année la plus chaude étant 2018 avec 12.3 °C et la plus fraîche 1985 avec 9.4 °C) de la période 1981 - 2019. (tableau 2, figure 2).

Tableau 2 : Température moyenne annuelle de l'air de l'inter-stations (°C).

Table 2 : Mean annual air temperature at the inter-stations (°C).

Années	Température moyenne annuelle	Années	Température moyenne annuelle
1980	9.2	2000	11.6
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

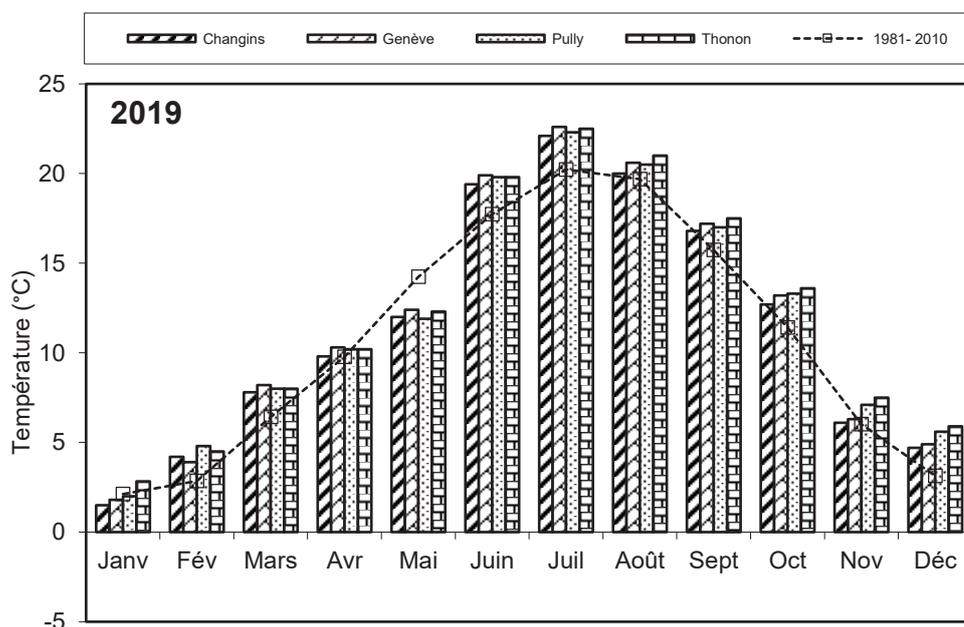


Figure 1 : Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2019 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 1 : Mean monthly air temperature at each station in 2019 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

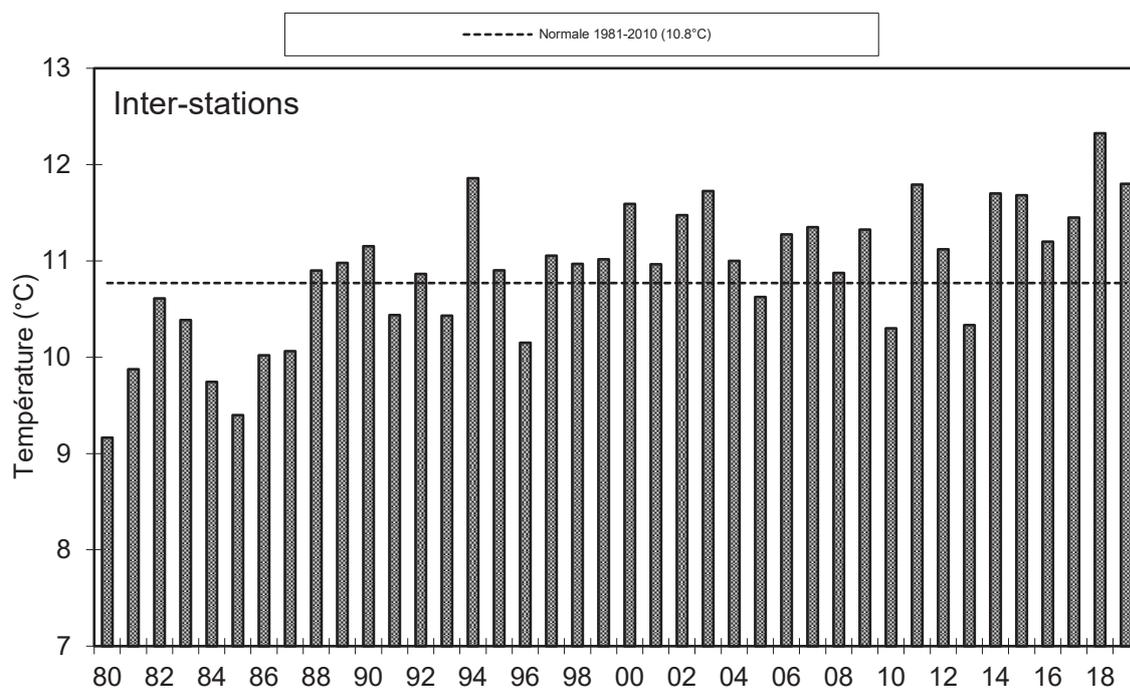


Figure 2 : Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C).

Figure 2 : Mean annual air temperature for the inter-stations (°C).

2. PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2019 sur le bassin lémanique est de 1'004.1 mm, soit 4 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 2019 une année normale. Pully est la station la plus arrosée avec 1'150 mm, Genève avec 842 mm à les précipitations les moins importantes (tableau 3, figure 3).

Le dernier trimestre fut très pluvieux (+141 mm par rapport à la normale), permettant ainsi à l'année 2019, d'être considérée à pluviométrie normale. Néanmoins, hormis le mois de juin, ses 3 premiers trimestres ont été plus secs que la normal (figure 3)

Tableau 3 : Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2019.

Table 3 : Monthly rainfall (mm) at each station in 2019.

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	42.6	47.8	51.8	29.5	72.9
Février	40.2	33.6	48.0	48.5	60.8
Mars	57.4	73.0	56.1	46.5	68.5
Avril	63.1	61.7	88.0	79.0	73.5
Mai	40.7	57.6	123.7	95.0	92.8
Juin	112.0	125.8	113.9	115.5	94.3
Juillet	44.0	75.5	78.0	49.0	83.8
Août	60.4	83.5	103.3	85.0	86.6
Septembre	25.0	20.8	44.3	36.5	99.0
Octobre	102.2	147.8	142.5	118.0	102.5
Novembre	114.1	154.5	160.3	138.0	83.0
Décembre	140.1	169.2	140.5	133.0	88.9
Total Annuel	841.8	1'050.8	1'150.4	973.5	1'008.9

En inter-stations, l'année 2019 se classe au 23^e rang (sur 39) de la chronologie pluviométrique 1981 - 2019 (la 1^{ère} étant 2001 avec 1'299 mm, la dernière étant 1989 avec 661 mm) (tableau 4, figure 4).

Tableau 4 : Pluviométrie annuelle de l'inter-stations (mm).

Table 4 : Annual rainfall at the inter-stations (mm).

Années	Pluviométrie total annuel	Années	Pluviométrie total annuel
1980	1'067.1	2000	1'028.2
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

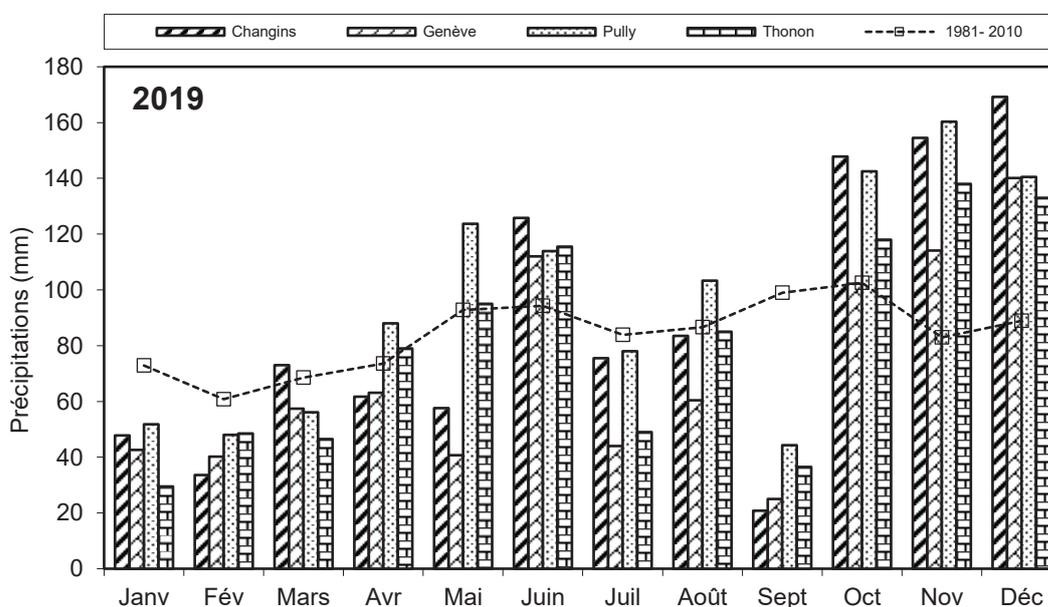


Figure 3 : Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2019 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 3 : Monthly rainfall at each station in 2019 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

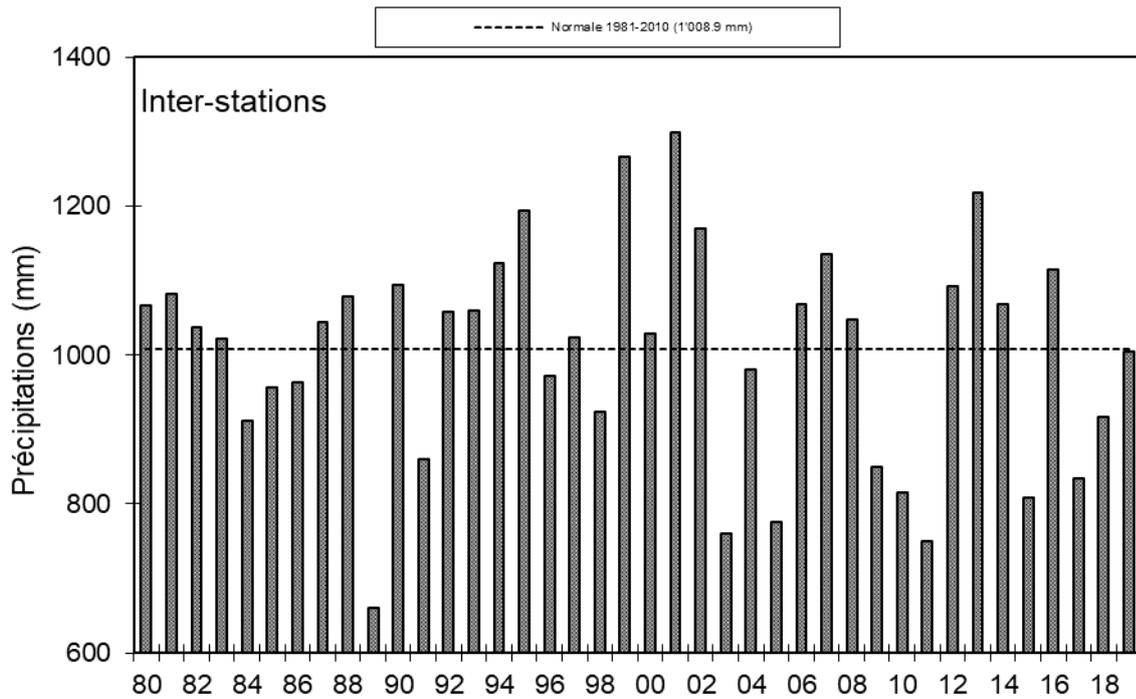


Figure 4 : Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm).

Figure 4 : Annual rainfall at the inter-stations (mm).

3. INSOLATION

L'insolation fut excédentaire durant les trois premiers trimestre (+300 heures par rapport à la moyenne 1981-2010) (tableau 5, figure 5) ; le dernier trimestre lui se situe dans la normale.

Tableau 5 : Insolation mensuelle à chaque station en 2019 (h).

Table 5 : Monthly insolation at each station in 2019 (h).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	80	98	85	63	62.4
Février	169	183	176	149	90.7
Mars	193	204	186	201	156.4
Avril	193	202	205	225	182.1
Mai	224	218	200	258	208.1
Juin	286	281	273	309	236.7
Juillet	304	303	296	323	258.6
Août	248	252	247	256	236.8
Septembre	202	221	210	212	183.6
Octobre	111	122	119	117	120.0
Novembre	52	52	48	55	69.2
Décembre	53	64	58	32	49.8
Total annuel	2'113	2198.5	2'101	2'198	1'854.4

L'année 2019 avec une moyenne inter-stations de 2'152.8 heures est une année ensoleillée. Elle se classe troisième sur la période 1980 - 2019 (la 1^e étant 2003 avec 2'290 h, la dernière étant 1987 avec 1'442 h).

Tableau 6 : Insolation annuelle de l'inter-stations (h).

Table 6 : Annual insolation at the inter-stations (h).

Années	Insolation total annuel	Années	Insolation total annuel
1980	1'672.3	2000	1'998.9
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

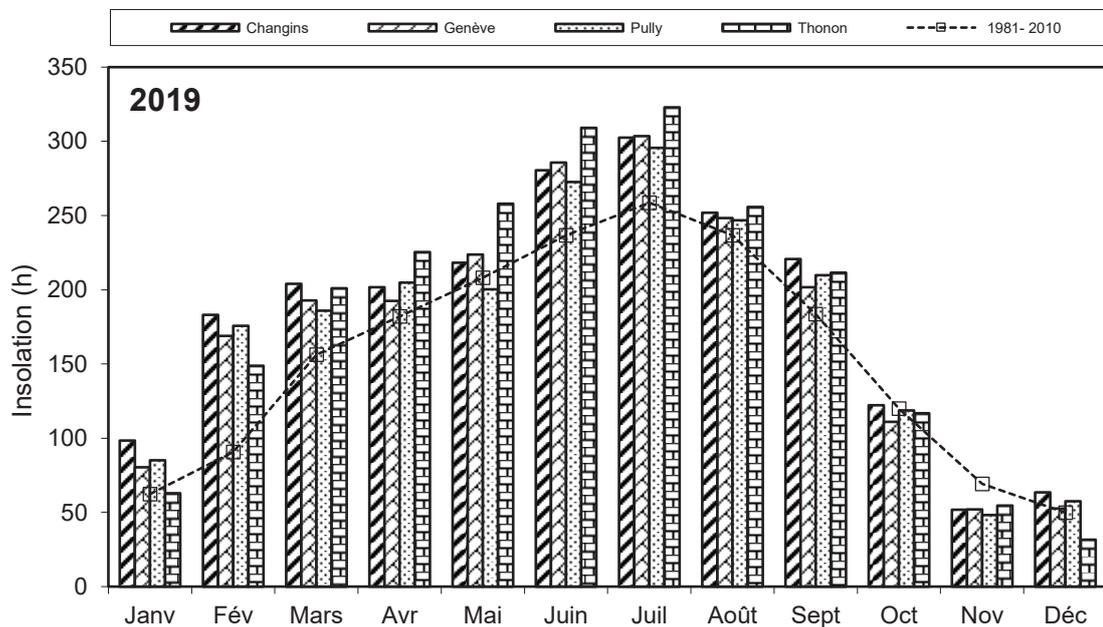


Figure 5 : Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2019 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 5 : Monthly insolation at each station in 2019 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

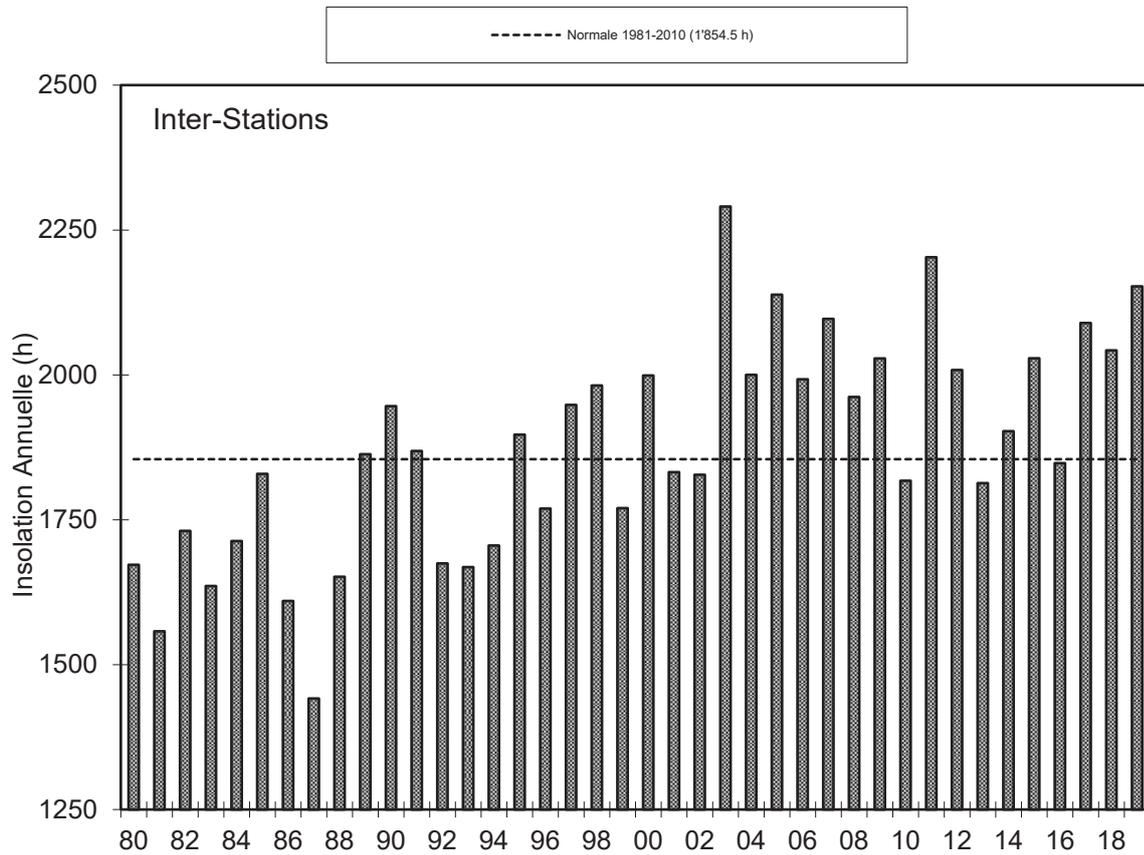


Figure 6 : Insolation annuelle de l'inter-stations.
 Figure 6 : Annual insolation at the inter-stations.

4. RAYONNEMENT

La moyenne inter-stations pour l'année 2019 est de 13.6 MJ·m⁻²·d⁻¹ (tableau 7, figure 7).

Tableau 7 : Rayonnement global mensuel à chaque station en 2019 (moyenne journalière en MJ·m⁻²·d⁻¹).
 Table 7: Global monthly solar irradiation at each station in 2019 (mean daily irradiation in MJ·m⁻²·d⁻¹).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	inter-stations 1981 - 2010
Janvier	4.5	4.9	4.8	3.6	3.6
Février	9.3	9.7	9.4	8.6	6.5
Mars	13.7	13.7	12.7	13.2	11.2
Avril	18.0	17.1	17.6	17.5	15.6
Mai	21.0	20.4	18.8	20.5	18.8
Juin	24.5	24.4	23.6	24.5	21.3
Juillet	24.7	24.4	23.9	24.4	21.3
Août	20.5	19.8	19.5	19.2	18.2
Septembre	15.8	15.7	15.0	14.8	13.4
Octobre	8.2	8.2	8.0	7.7	7.9
Novembre	4.4	4.2	4.2	3.8	4.3
Décembre	3.1	3.4	3.4	2.3	2.9
Moyenne Annuelle	14.0	13.8	13.4	13.3	12.1

Pour l'inter-stations en 2019, le rayonnement global annuel obtenu est de 4'981. MJ·m⁻², ce qui classe l'année, deuxième sur la période 1981 – 2019 (tableau 8, figure 8).

Tableau 8 : Rayonnement global annuel en inter-stations (MJ·m⁻²).

Table 8 : Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ·m⁻²).

Années	Rayonnement global total annuel	Années	Rayonnement global total annuel
1980	4'153	2000	4'488
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

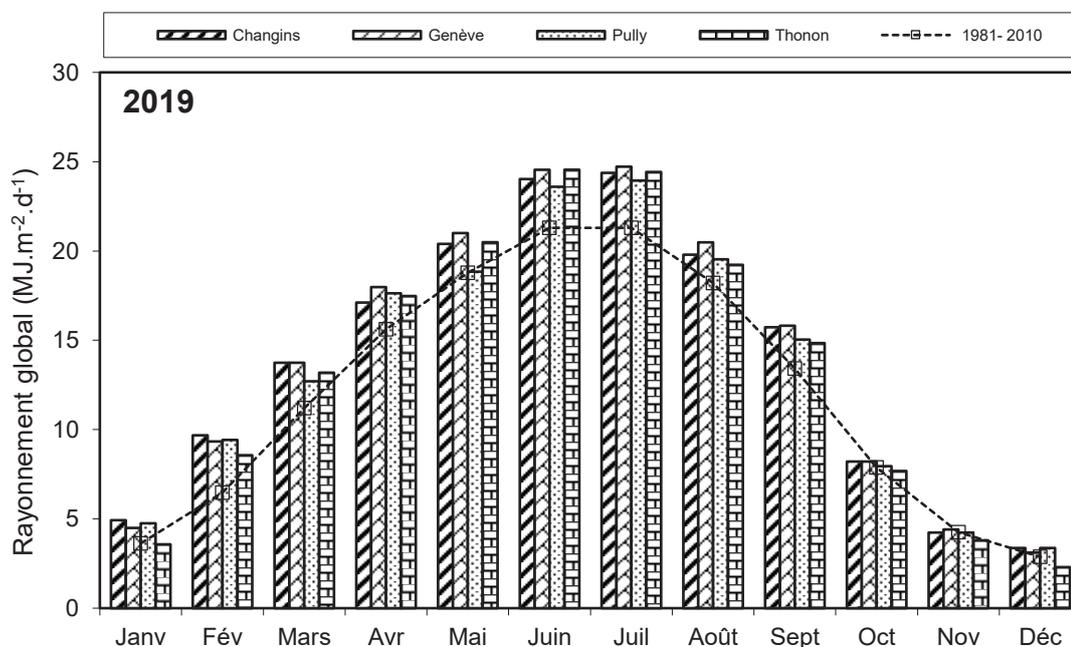


Figure 7 : Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2019 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 7 : Mean monthly global solar irradiation at each station in 2019 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1981 - 2010 (curve).

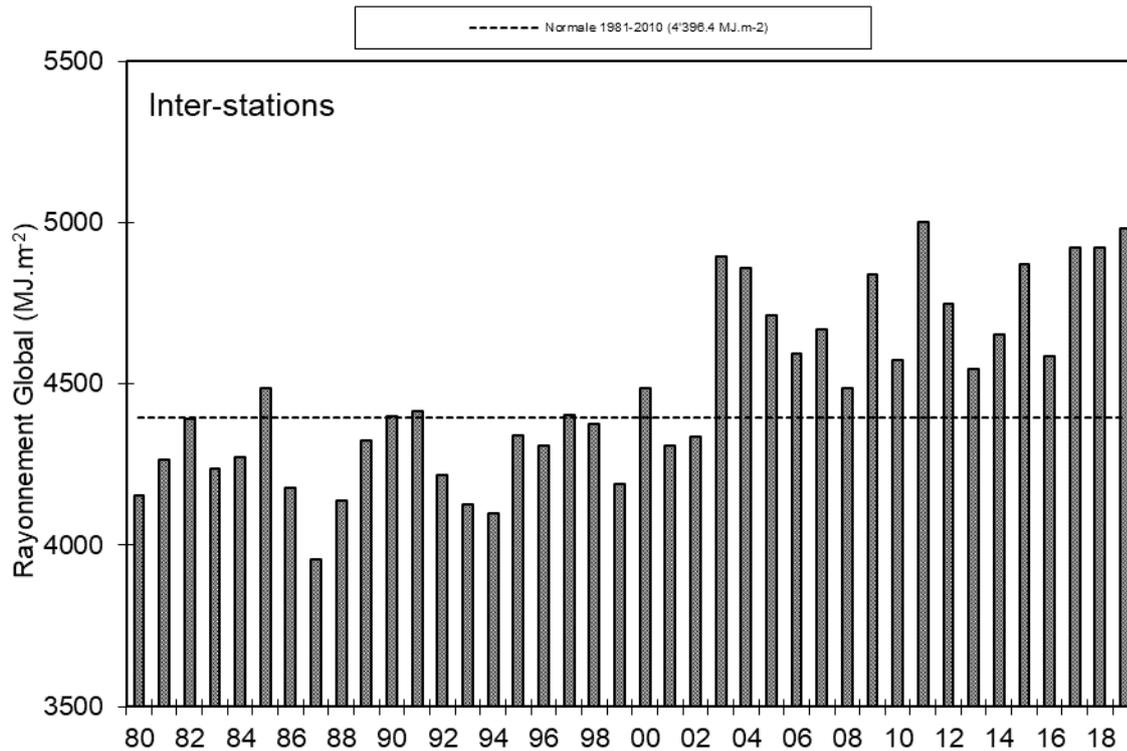


Figure 8 : Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ.m⁻²).

Figure 8 : Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ.m⁻²).

5. VENT

5.1. VITESSE DU VENT

En 2019 à Changins, station de référence, les mois de mars et mai furent venteux (12 jours de vent fort ont été enregistrés sur ces 2 mois), le reste de l'année, les vitesses de vent sont inférieures à la moyenne de la période 1981-2010. (Tableau 9, figure 9 et tableau 10).

Tableau 9 : Moyenne mensuelle de la vitesse du vent en 2019 (m.s⁻¹)

Table 9 : Mean monthly wind speeds in 2019 (m.s⁻¹).

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1981-2010
Janvier	2.5	2.8	1.9	2.0	2.4
Février	1.9	1.9	1.7	0.9	2.8
Mars	3.6	3.9	2.2	1.7	3.3
Avril	2.8	2.8	1.9	1.35	3.3
Mai	3.3	3.6	1.9	1.9	2.8
Juin	1.9	1.9	1.4	0.9	2.8
Juillet	2.2	2.5	1.9	1.4	2.7
Août	2.2	2.2	1.7	1.2	2.6
Septembre	2.8	2.8	1.9	1.5	2.6
Octobre	2.2	1.9	1.4	1.0	2.4
Novembre	2.2	2.2	1.7	1.3	2.5
Décembre	2.5	2.8	1.9	1.6	2.6
Moyenne annuelle	2.5	2.6	1.8	1.4	2.7

Pour l'année 2019 à Changins, il a été enregistré 26 jours de vent fort ($> 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) dont 12 jours durant le 1^e trimestre et 4 durant le dernier trimestre. Le maximum de vent moyen journalier a été relevé pour l'année 2019 le 13 mai (avec $12.74 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (figure 9). De plus, il y a eu en 2019, 9 jours où la vitesse du vent a été enregistrée à $4.99 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (que l'on peut intégrer au nombre de jours à vent fort, car les données de vent sont fournies arrondies et en km/h). L'année 2019 est en moyenne annuelle la plus faible de la période 1981-2019 (tableau 9).

Tableau 10 : Vent moyen annuel à Changins ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Table 10 : Mean annual wind speed at Changins ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1980	2.5	2000	2.6
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

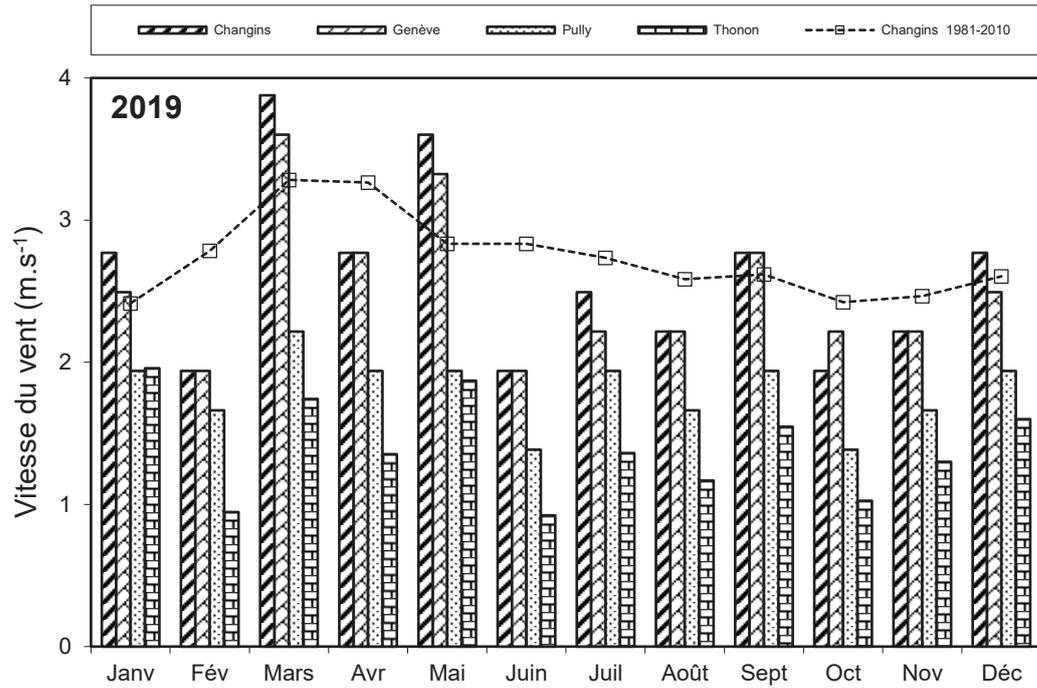


Figure 9 : Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2019 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1981 - 2010 (courbe).

Figure 9 : Mean monthly wind speeds at each station in 2019 (histogram), and at Changins for the period 1981 - 2010 (curve).

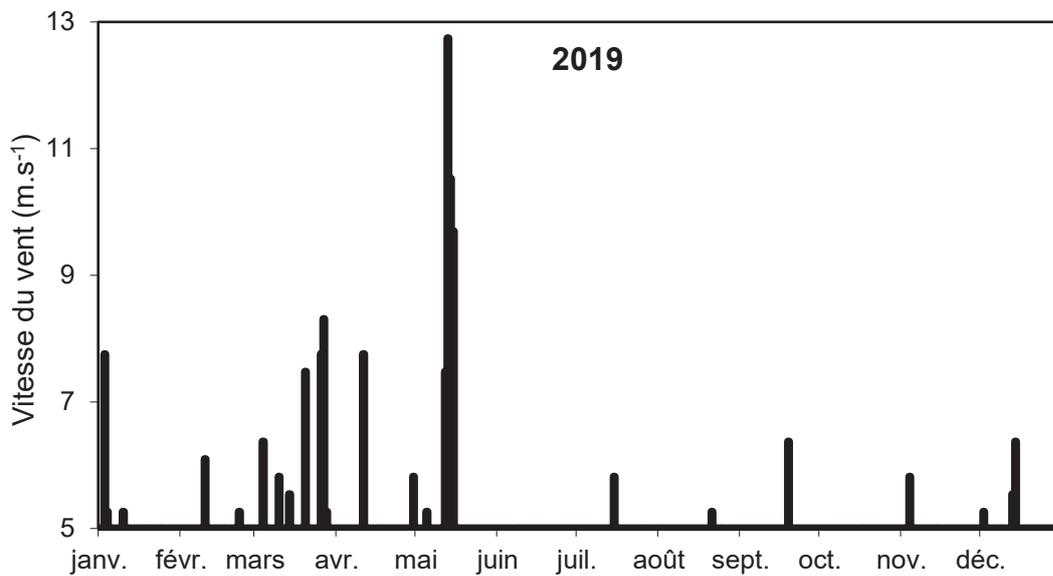


Figure 10 : Répartition annuelle (en 2019) des vents forts (> 5 m·s-1) à Changins.

Figure 10 : Annual distribution (in 2019) of strong winds (> 5 m·s-1) at Changins.

5.2. ROSE DES VENTS

Pour l'année 2019 à Changins, 58.3 % des vents (figure 11) se répartissent principalement selon le demi-cercle S-O-N. Les vents qui sont supérieurs à $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ représentent 13% des vents totaux, 53.8 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; et 37.7 % sont d'origine opposée S-O.

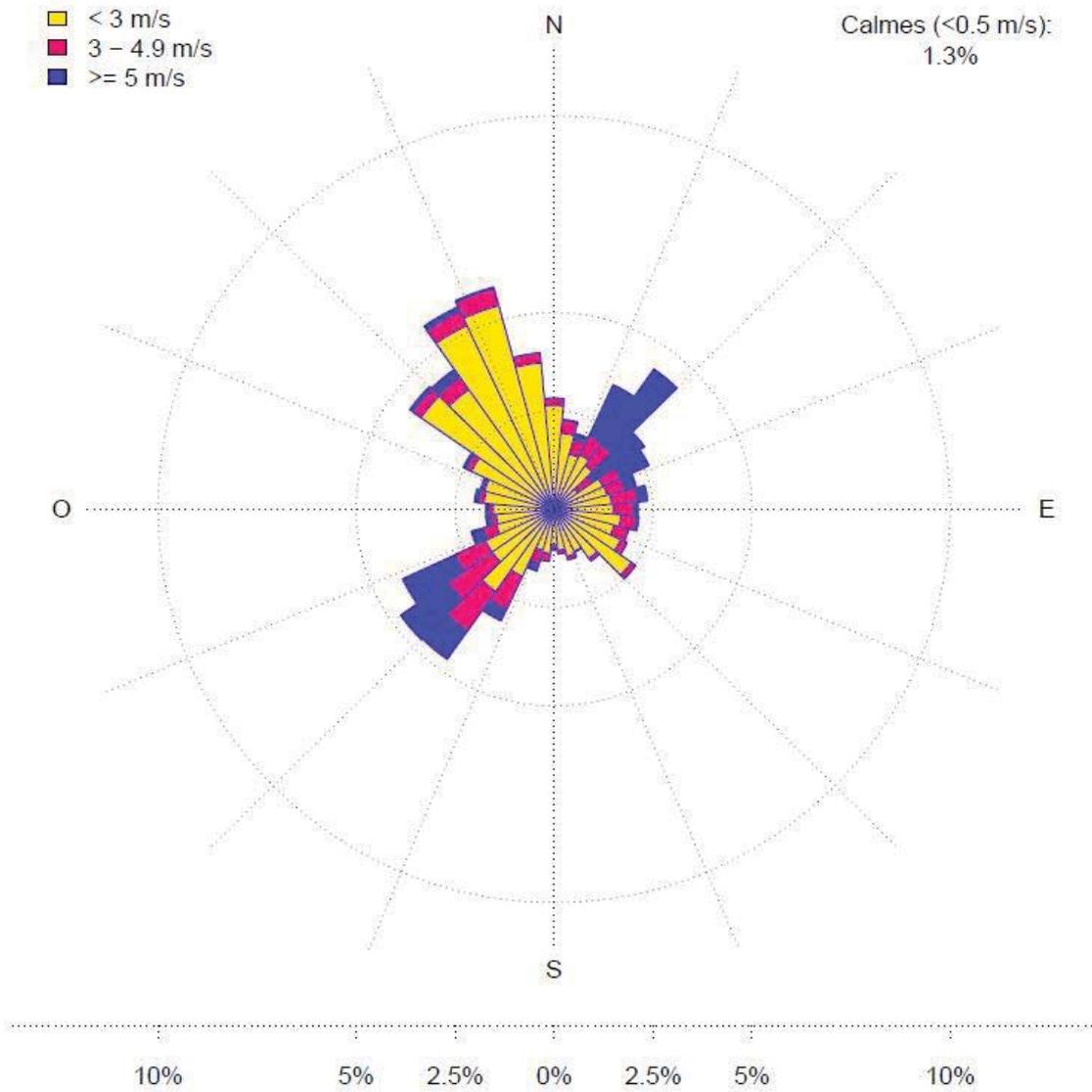


Figure 11 : Rose des vents moyens à Changins en 2019 (calculée en moyennes horaires de la vitesse du vent - échelle : % d'occurrence).

Figure 11 : Wind directions at Changins in 2019 (calculated as the hourly mean wind-scale velocity : % occurrence).