

# ÉVOLUTION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU LÉMAN ET DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

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

CAMPAGNE 2023

PAR

Viet TRAN KHAC, Philippe QUETIN et Orlane ANNEVILLE

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

### RÉSUMÉ

*L'année 2023 a été exceptionnellement chaude, marquée par un déficit pluviométrique et un excédent d'ensoleillement. Elle se classe au 2<sup>e</sup> rang des années les plus chaudes dans la chronologie, juste après l'année 2022.*

*Les conditions météorologiques en 2023 ont permis un brassage hivernal partiel jusqu'à 130m. La température de l'eau au fond est demeurée stable à 6.2°C durant toute l'année, ce qui représente une augmentation continue de 1.1°C depuis le dernier brassage complet en 2012. Les concentrations en oxygène au fond présentent une faible variabilité avec une moyenne de 2.9 mg·L<sup>-1</sup>, restant inférieures au seuil de 4 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> tout au long de l'année.*

*En 2023, les concentrations moyennes annuelles en phosphore total et en orthophosphates sont respectivement de 16.9 µgP·L<sup>-1</sup> et de 13.0 µgP·L<sup>-1</sup>.*

*La concentration moyenne en nitrate est de 0.57 mgN·L<sup>-1</sup>, dépassant légèrement le seuil de 0.56 mgN·L<sup>-1</sup> exigé par l'ordonnance sur la protection des eaux suisse.*

*La concentration des ions chlorures dans le Léman continue d'augmenter après une période de stabilisation observée entre 2016 et 2021. La concentration moyenne annuelle de 2023 s'élève à 10.79 mg·L<sup>-1</sup>.*

### ABSTRACT

*In 2023, the weather conditions were exceptionally warm, with a deficit in rainfall and an excess of sunlight. It ranks second in the chronology, just after the year 2022.*

*The meteorological conditions in 2023 allowed for partial winter mixing down to a depth of 130 meters. The water temperature at the bottom remained stable at 6.2°C throughout the year, representing a continuous increase of 1.1°C since the last complete mixing in 2012. Oxygen concentrations at the bottom showed low variability, with an average of 2.9 mg·L<sup>-1</sup>, remaining below the threshold of 4 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> throughout the year 2023.*

*In 2023, the average annual concentration of total phosphorus and orthophosphates was 16.9 µgP·L<sup>-1</sup> and 13.0 µgP·L<sup>-1</sup> respectively.*

*The average nitrate concentration was 0.57 mgN·L<sup>-1</sup>, slightly exceeding the threshold of 0.56 mgN·L<sup>-1</sup> required by the Swiss water protection ordinance.*

*The concentration of chloride ions in Lake Geneva continues to increase after a period of stabilization observed between 2016 and 2021. The average annual concentration in 2023 was 10.79 mg·L<sup>-1</sup>.*

## 1. INTRODUCTION

Ce rapport traite du suivi physico-chimique du Léman réalisé dans le Grand Lac à la station SHL2 en 2023, et présente l'évolution de 17 paramètres (température, pH, oxygène dissous, phosphore total, orthophosphates, phosphore total particulaire, azote total, azote ammoniacal, nitrate, azote organique particulaire, chlorure, carbone organique particulaire, silice, et transparence).

Toutes les conditions météorologiques de l'année 2023 (température de l'air, pluviométrie, ensoleillement, rayonnement global et vents) sont présentées dans 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 (Figure 1).

Le présent rapport utilise les données du suivi environnemental du Léman fournies par l'Observatoire OLA (Observatoire des Lacs Alpins) pour la période 1973-2023 (SOERE OLA-IS 2023).

## 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 Évian et Lausanne (coord. CH : 534.700/144.950) et correspond à la partie la plus profonde du lac (-309.7 m)

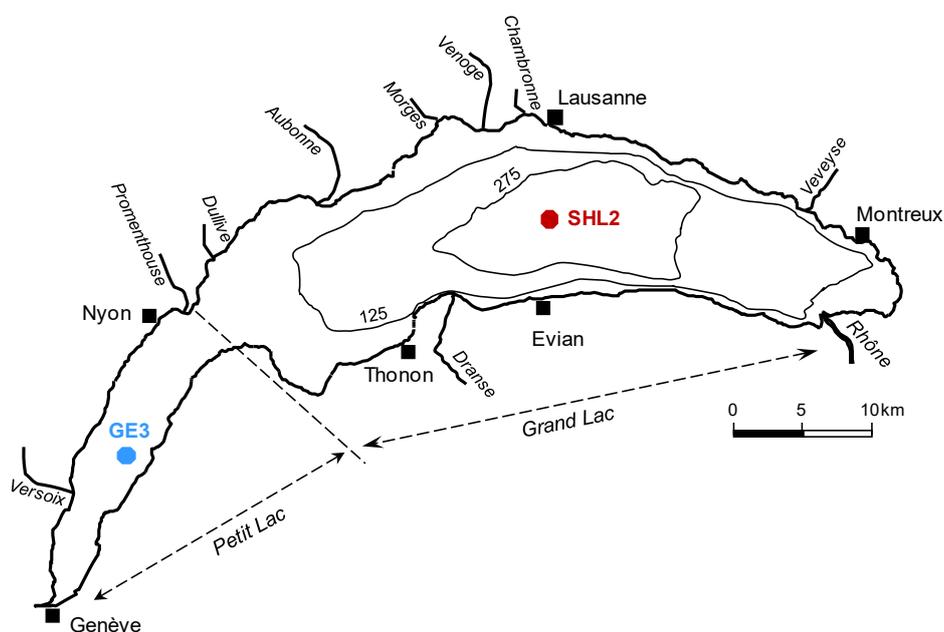


Figure 1. Situation des points de prélèvement pour le suivi de la CIPEL sur le Léman

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

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

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

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

En 2023, il y a eu 18 campagnes de prélèvements, réparties selon les dates indiquées dans le Tableau 1.

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

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

N° Campagne	Date	N° Campagne	Date
1	2023-02-02	10	2023-07-10
2	2023-02-21	11	2023-07-26
3	2023-03-07	12	2023-08-08
4	2023-03-28	13	2023-08-21
5	2023-04-19	14	2023-09-07
6	2023-05-11	15	2023-09-20
7	2023-05-22	16	2023-10-11
8	2023-06-13	17	2023-11-21
9	2023-06-27	18	2023-12-19

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

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

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

### 3. PARAMETRES PHYSIQUES

#### 3.1. BRASSAGE HIVERNAL ET STRATIFICATION EN 2023

En 2023, le brassage hivernal était encore partiel, pour la onzième année consécutive. La profondeur maximale d'homogénéisation thermique est observée à 130 m lors de la campagne du 21 février 2023 (Figure 2ac).

La température de l'eau au fond est demeurée relativement stable à 6.2°C durant toute l'année. Le brassage partiel n'est pas suffisant pour compenser la consommation chimique et biologique de l'oxygène dissous et pour réoxygéner les couches d'eau profonde du lac (Figure 2c). La concentration en oxygène dissous mesurée au fond du lac est de 1.9 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup>, soit une baisse de 1 mgO<sub>2</sub>·L<sup>-1</sup> par rapport à l'année 2022.

A partir du printemps de 2023, la mise en place de la stratification thermique entraîne l'augmentation de l'activité phytoplanctonique. La stabilité de la colonne d'eau est propice pour le développement phytoplanctonique.

La stratification estivale maximale est observée le 21 août avec une température maximale des eaux de surface de 27.3°C.

La déstratification qui entraîne un enfoncement de la thermocline, est observée à partir du 20 septembre 2023 avec une diminution en oxygène dans le métalimnion dû à l'activité microbienne. (Figure 2b).

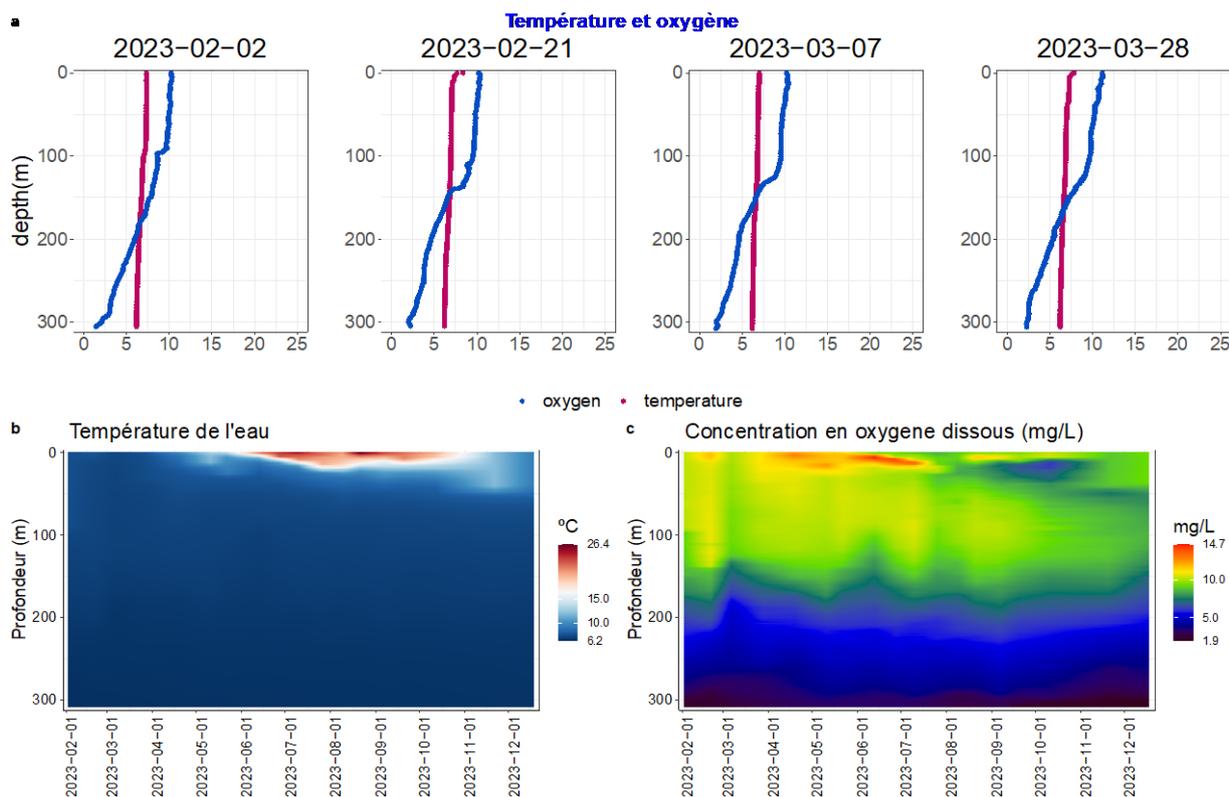


Figure 2. Profils verticaux de (a) température et d'oxygène pour les trois premiers mois de l'année, (b) Température de l'eau en 2023, (c) Concentration en oxygène dissous

Figure 2. Vertical profiles of (a) temperature and oxygen for the first three months of the year, (b) Water temperature in 2023, (c) Dissolved oxygen concentration

### 3.2. VARIABILITÉ ANNUELLE ET INTER-ANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE DE L'EAU

L'année 2023 est une année exceptionnellement chaude avec un fort rayonnement solaire quasiment comparable à 2022. Elle est la deuxième année la plus chaude après 2022 sur la chronique (1991-2023). Ce caractère exceptionnel des conditions météorologiques conduit à des conditions thermiques particulières avec notamment une couche de surface (0-10m) plus chaude que la distribution des températures des années précédentes. A l'exception du mois de mai, la température de l'eau de la couche de surface se situe à l'intérieur de la plage interquartile du boxplot. Pour le reste de l'année, la température de l'eau atteint au moins le troisième quartile du boxplot mensuel et dépasse parfois de manière significative ce seuil (Figure 3).

La variation inter-annuelle de la température à 5m et 309m est présentée dans la Figure 4. La variabilité de la couche d'eau de surface est plus marquée que la couche d'eau à 309m. Les dernières années ont connu les températures de surface et de fond les plus élevées dans la chronique des données.

La température moyenne annuelle dans la couche 0-10 m montre une tendance au réchauffement statistiquement significative depuis 1973 ( $p$ -value < 0.005). En 2023, la température de cette couche est de 13.6°C, soit du même ordre de grandeur que 2020 et 2022 qui sont toutes les deux les années exceptionnellement chaude.

Dans la couche d'eau profonde, la température de l'eau est passée de 5.1 °C en 2012 à 6.2 °C en 2023, soit une augmentation de 1.1°C en 11 ans. Cette hausse de température s'explique principalement par l'absence de brassage hivernal complet (Figure 4).

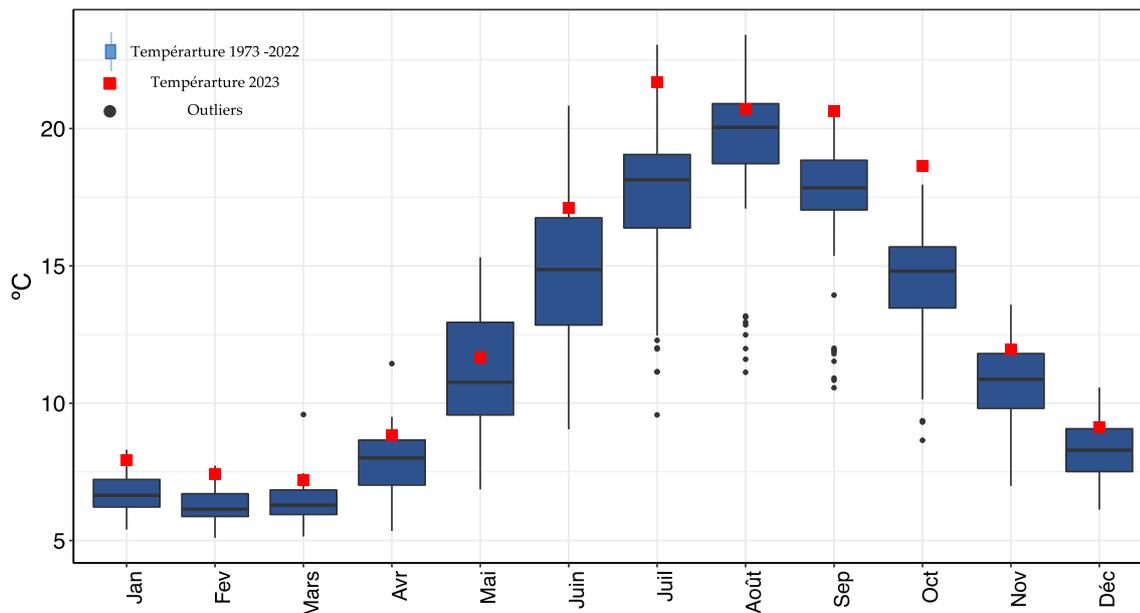


Figure 3. Température moyenne mensuelle de l'eau de la couche (0-10m) du 1973-2022 (boxplot) et en 2023 (carré rouge) – Léman – Grand Lac (SHL2)

Figure 3. Monthly average water temperature of the 0-10m top layer from 1973 – 2022 (boxplot) and in 2023 (red square), Lake Geneva – Grand Lac (SHL2)

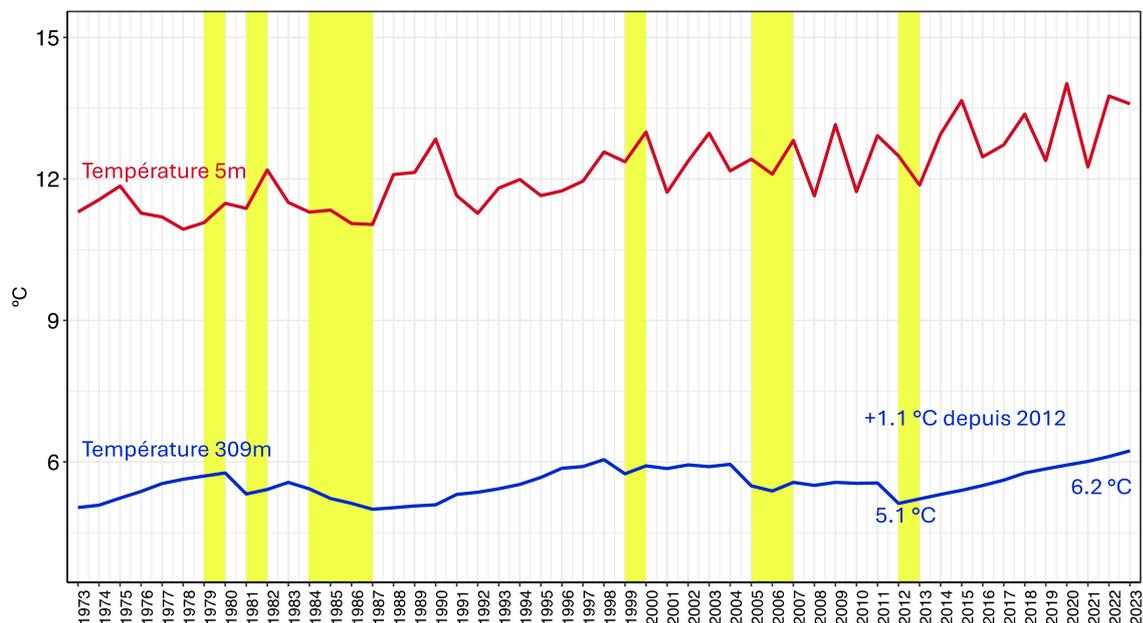


Figure 4. Évolution de la température moyenne annuelle de l'eau dans le lac aux profondeurs de 5 et 309 m de 1973 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2). Les barres en jaune représentent les hivers qui ont conduit à une homogénéisation de la colonne d'eau (soit par l'effet de mélange convective ou d'écoulements de densité).

Figure 4. Inter-annual changes in annual mean water temperature in the lake at depths of 5 and 309 meters from 1973 to 2023, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). The yellow shades represent winters when the water column has been homogenized (due to convective mixing and density currents).

## 4. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ASSOCIÉ À L'ACTIVITÉ PHYTOPLANCTONIQUE

### 4.1. TRANSPARENCE DE L'EAU

La transparence de l'eau en hiver 2023 est à 15m. Cette transparence diminue progressivement dès l'augmentation des activités phytoplanctoniques et atteint la valeur minimale de 3.4m le 19 avril 2023. Ces biomasses phytoplanctoniques sont broutées par le zooplancton. Par conséquent, la phase des eaux claires a été observée avec une augmentation de la transparence de l'eau à 6.3m le 11 mai 2023.

Après cette date, la transparence reste faible durant l'été. Sur la dernière partie de l'année, elle augmente progressivement et atteint 10.5m le 21 novembre 2023 (Figure 5a).

La dynamique de transparence inter-annuelle est présentée selon les saisons dans la Figure 5b.

La transparence en hiver est plus importante que lors des autres saisons et présente une tendance de diminution de façon statistiquement significative. Cette baisse s'explique par une activité phytoplanctonique hivernale de plus en plus importante et une augmentation de la biomasse algales (Anneville et al. 2008). Aucune tendance n'est observée pour les autres saisons.

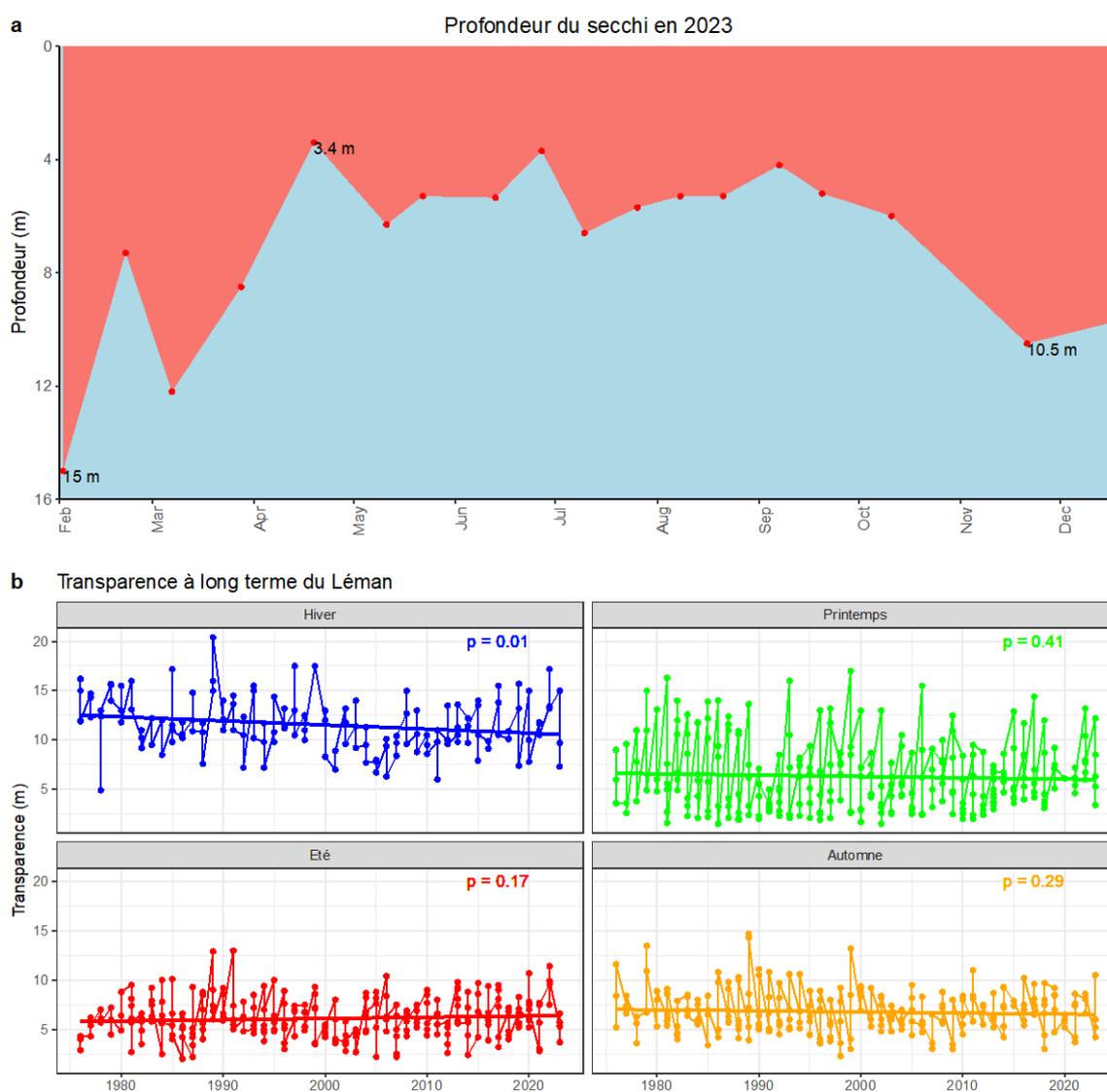


Figure 5. Transparence de l'eau (a) en 2023 et (b) à long terme du Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 5. Water transparency (a) in 2023 and (b) long term, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

#### 4.2. PH

La Figure 6 représente l'évolution saisonnière du pH dans la colonne d'eau du lac. Le pH est aux alentours de 8 dans la couche de surface lors du mélange hivernal. En présence des conditions propices (lumière et température), l'augmentation de l'activité phytoplanctonique provoque une augmentation du pH à 8.2 le 28 mars 2023. Cette hausse est provoquée par la consommation de CO<sub>2</sub> lors de la photosynthèse. Durant l'été, le pH reste élevé dans les dix premiers mètres entre 8.6 à 8.8. Les mois de septembre et d'octobre sont exceptionnellement chauds en 2023. Le pH reste élevé et atteint la valeur maximale de 8.9 le 11 octobre 2023. Le pH diminue progressivement par la suite et le pic du pH s'enfonce en raison de la déstratification de la masse d'eau et de la diminution de l'activité phytoplanctonique. (Figure 6).

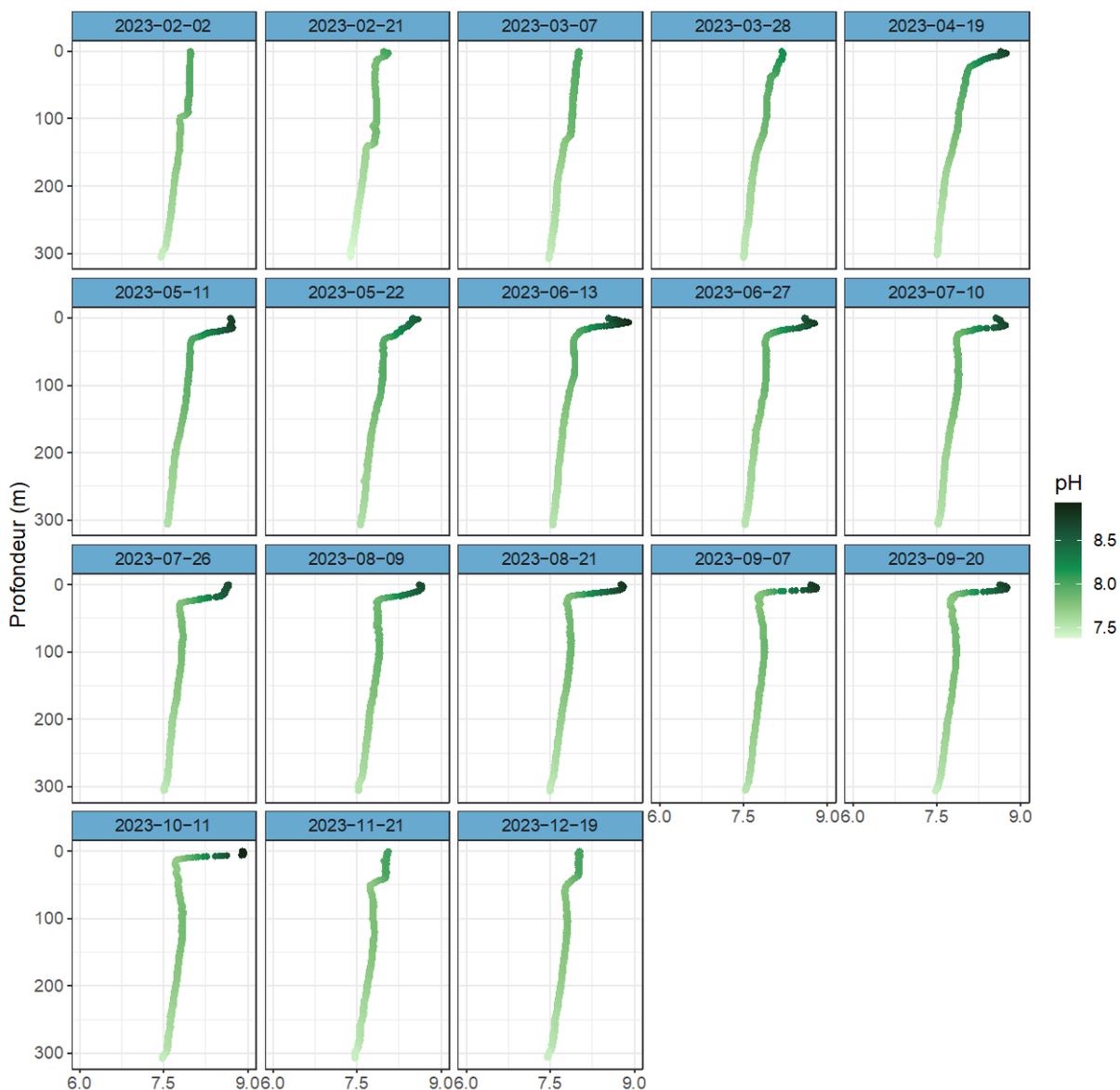


Figure 6. pH des eaux du lac en fonction de la profondeur, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 6. Vertical profiles of pH, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

### 4.3. OXYGÈNE DISSOUS

La Figure 7 montre l'évolution des profils de saturation en oxygène dans la colonne d'eau du lac entre 0 et 30 m.

L'activité phytoplanctonique printanière engendre une sursaturation en oxygène à la surface qui atteint un pic de 147 % à 5.6 m le 13 juin 2023. Par la suite, l'oxygène dissous dans la couche d'eau superficielle reste en sursaturation jusqu'à l'été. A partir de l'automne, l'oxygène dans la couche 0-30 m diminue progressivement à cause de la baisse de l'activité photosynthétique. Ce phénomène peut aussi s'expliquer par la diffusion d'oxygène vers la couche d'eau inférieure qui est désoxygénée du fait de l'activité bactérienne qui y règne et du dégazage vers l'atmosphère lors de la sursaturation en oxygène dissous de l'épilimnion. Durant cette période, l'enfoncement de la thermocline se met en place. La diminution des concentrations en oxygène dissous de l'épilimnion induite par le transfert d'oxygène vers la couche d'eau plus profonde est observée avec un minimum à environ 80 % entre 0 et 30m durant le reste de l'année.

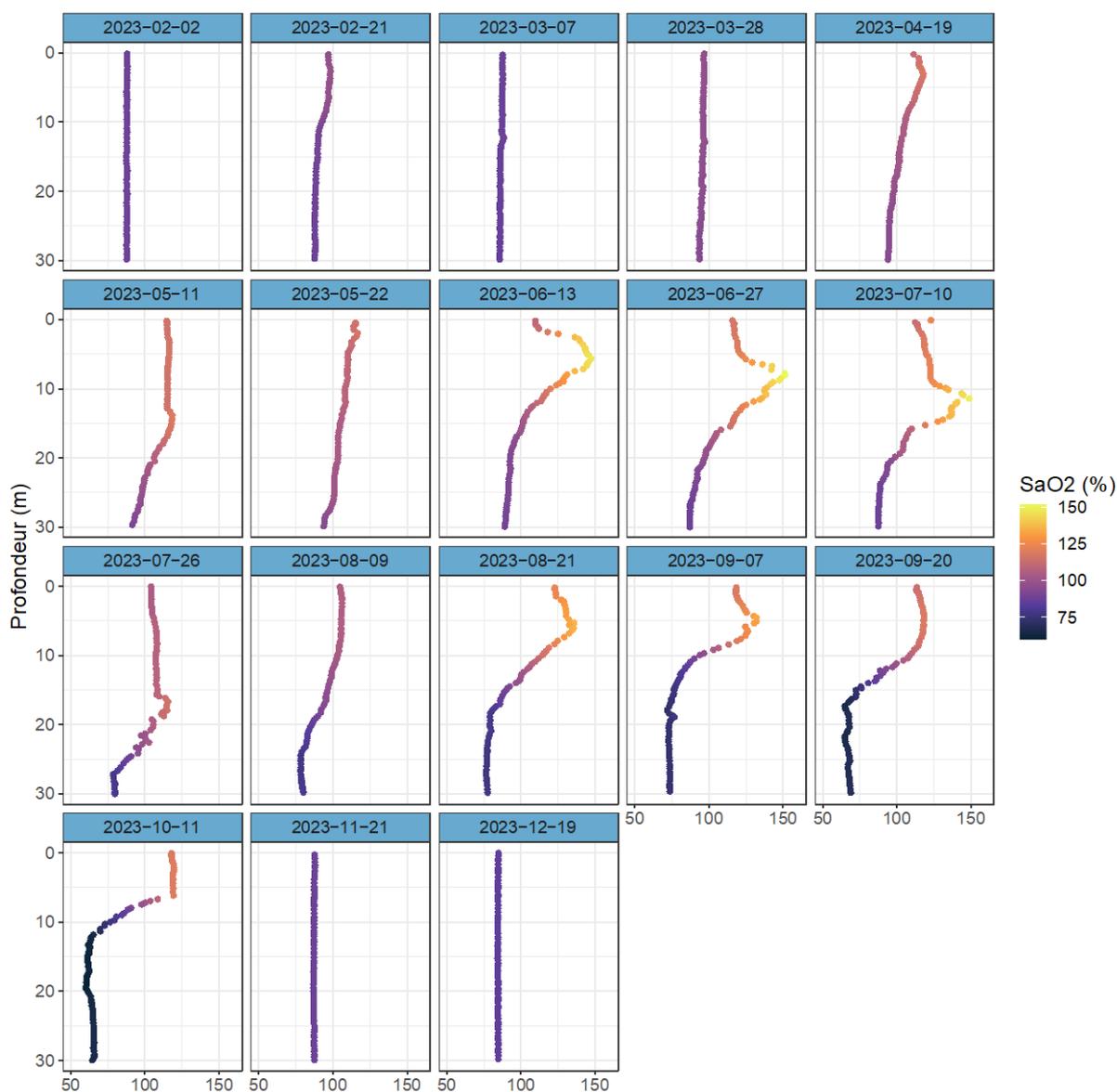


Figure 7. Saturation en oxygène dissous entre 0 et 30 m de la colonne d'eau, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 7. Saturation of dissolved oxygen between 0 and 30 m of lake's water column, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

En 2023, à l'issue de ce brassage, la concentration en oxygène dissous au fond du lac est de  $1,9 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$ . Cette concentration est inférieure à la valeur minimale de  $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  relative aux exigences de l'Ordonnance suisse sur la protection des eaux (OEaux).

Les concentrations d'oxygène demeurent inférieures au seuil de  $4 \text{ mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$  tout au long de l'année 2023 (Figure 8). En 2023, les concentrations en oxygène présentent une faible variabilité :  $1,22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (minimum),  $2,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (moyenne) et  $2,9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (maximum).

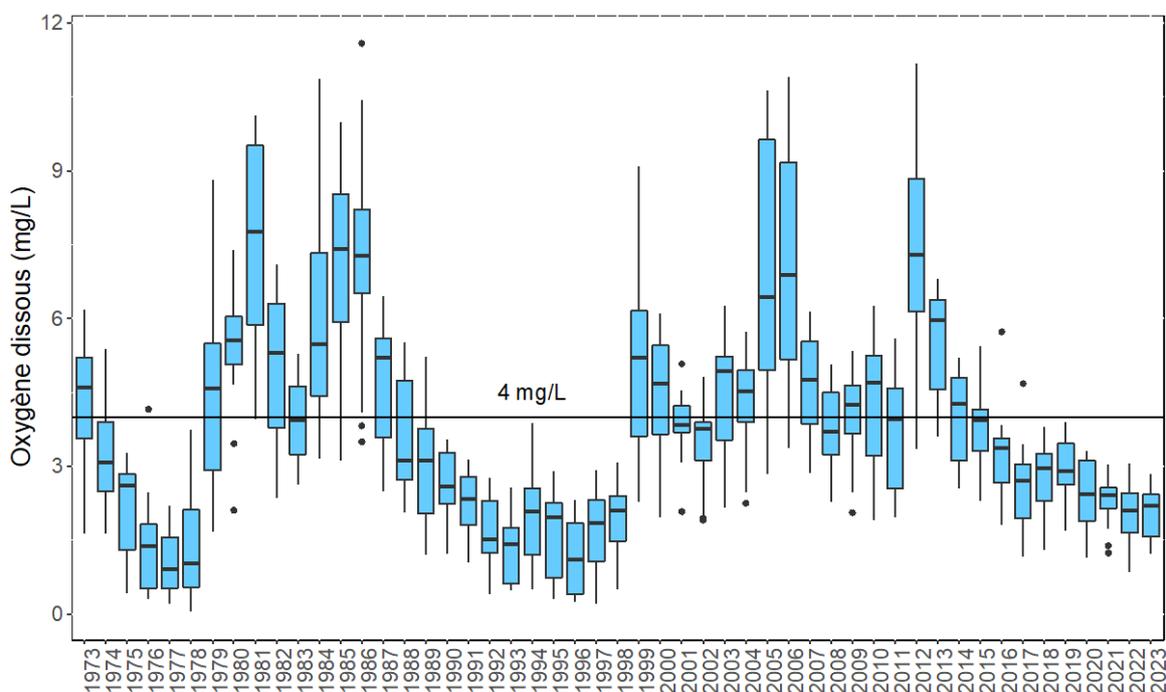


Figure 8. Évolution de la concentration en oxygène dissous dans les eaux à 309 m de 1972 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 8. Long-term changes in dissolved oxygen concentrations measured at 309 m from 1972 to 2023, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

#### 4.4. MATIÈRE PARTICULAIRE

La matière particulaire dans la couche d'eau superficielle est en partie composée de cellules phytoplanctoniques, il s'agit donc d'un indicateur de l'abondance phytoplanctonique en suspension dans l'eau. Les concentrations en carbone organique particulaire (COP) correspondent donc essentiellement à la quantité en carbone contenue dans l'ensemble du phytoplancton. Les concentrations en carbone, azote organique particulaire et phosphore total particulaire sont présentés dans la Figure 9.

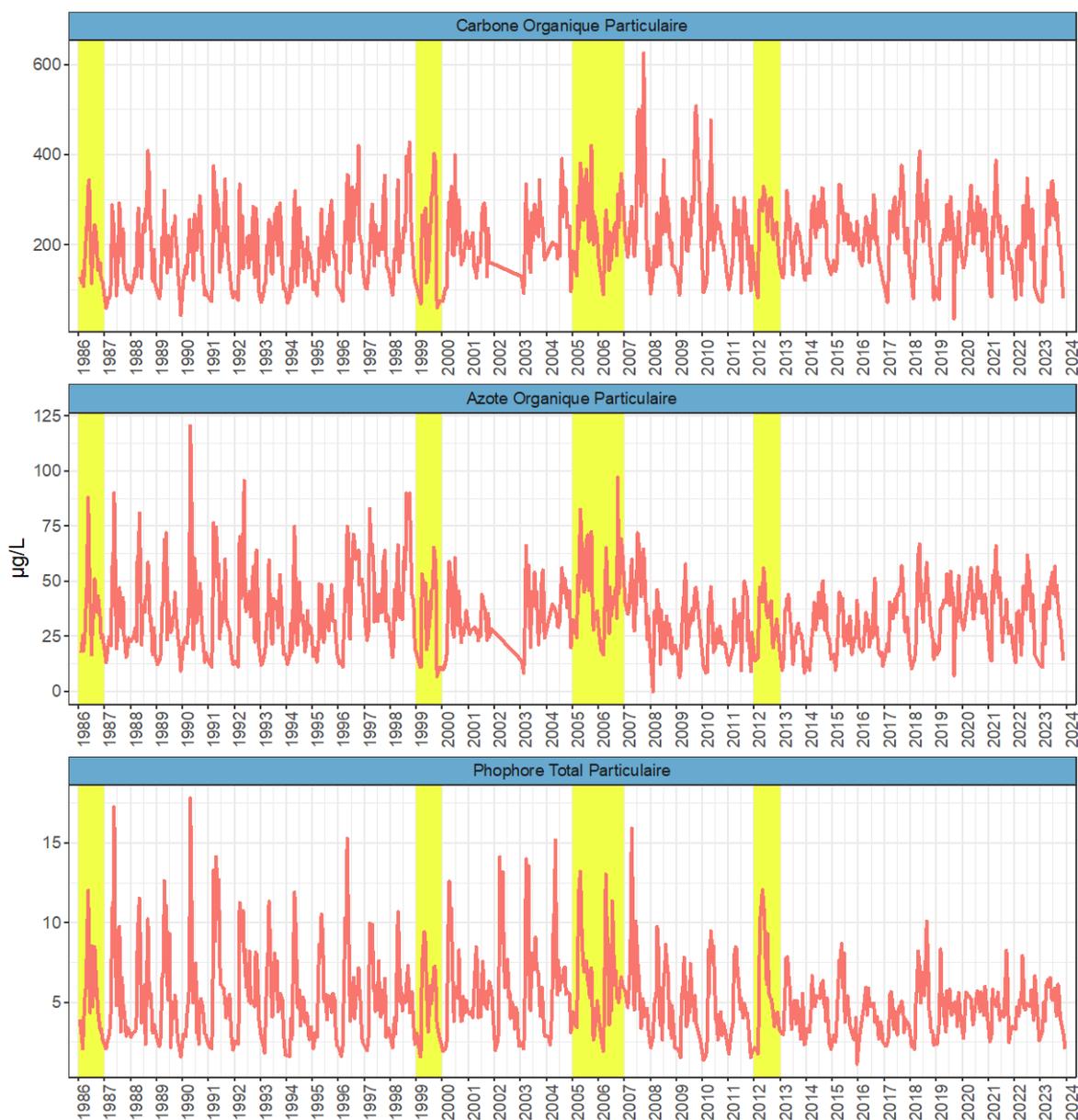


Figure 9. Évolution de la concentration en matière particulaire dans l'eau de la couche 0 - 20 m de 1986 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2) (a) Carbone organique particulaire, (b) Azote organique particulaire, (c) Phosphore total particulaire

Figure 9. Temporal change in particulate matter concentrations in the 0 - 20 m layer from 1986 to 2023, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) (a) Particulate organic carbon, (b) Particulate organic nitrogen, (c) Particulate total phosphorus

## 5. ELEMENTS NUTRITIFS ET CHLORURES

### 5.1. PHOSPHORE TOTAL ET ORTOPHOSPHATES

En 2023, la concentration moyenne annuelle pondérée en phosphore total estimée sur l'ensemble du grand lac est de  $16.9 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$ , soit similaire par rapport à l'année 2022 (Figure 10). La concentration moyenne annuelle pondérée en orthophosphates est de  $13.0 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$  en 2021, soit une baisse de  $0.5 \mu\text{gP}\cdot\text{L}^{-1}$  par rapport à l'année 2022.

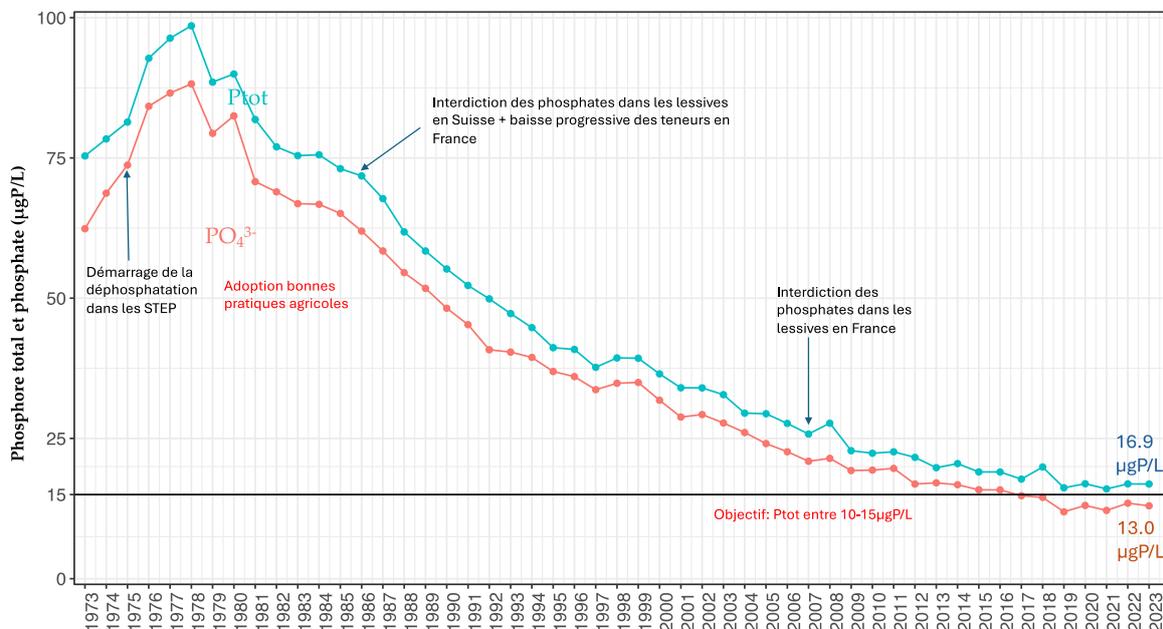


Figure 10. Évolution de la concentration moyenne annuelle pondérée des orthophosphates et de phosphore total estimée pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 10. Long-term change in weighted mean annual total concentration of orthophosphate and total phosphorus in the entire mass of lake's water from 1973 to 2023, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

### 5.2. AZOTE TOTAL, AZOTE NITRIQUE ET AZOTE AMONIACAL

L'azote nitrique ou nitrate est un élément nutritif essentiel au développement des micro-organismes photosynthétiques.

En 2023, la concentration moyenne en azote total est de  $701 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$ , soit une augmentation par rapport à l'année 2022. La concentration moyenne annuelle en nitrates en 2023 est de  $570 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$  et reste similaire à celle de 2022 (Figure 11). L'exigence de l'ordonnance sur la protection des eaux Suisse édicte une limite à  $560 \mu\text{gN}\cdot\text{L}^{-1}$  en nitrates. Les concentrations en nitrates dans les eaux du Léman en 2023 dépassent légèrement cette limite.

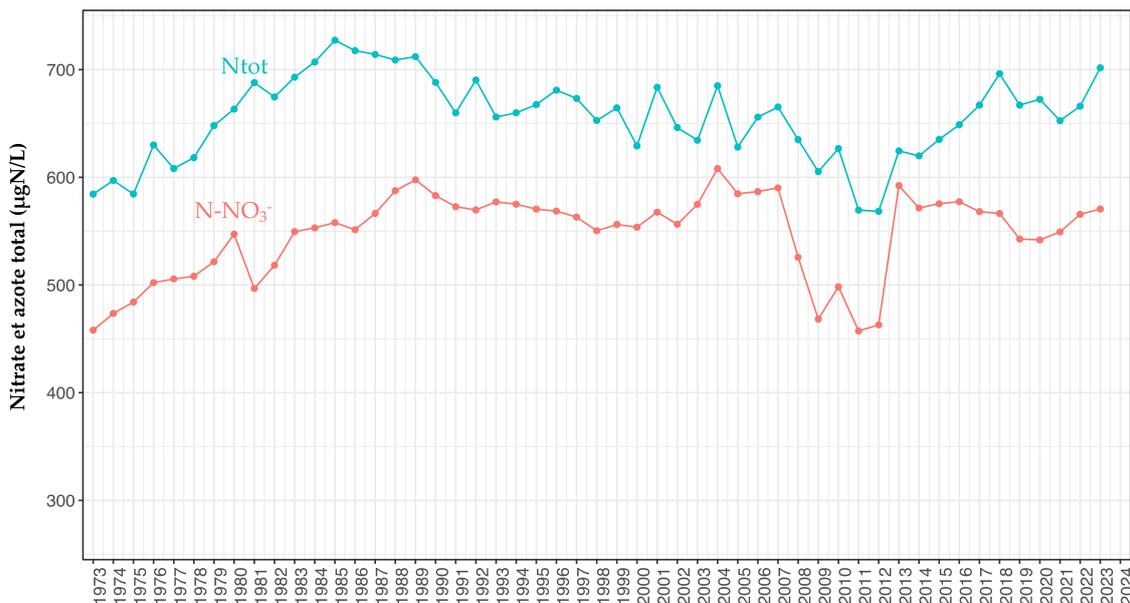


Figure 11. Évolution de la concentration moyenne annuelle pondérée d'azote total et d'azote nitrique pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 11. Change in the weighted mean annual total concentration of total nitrogen and nitrate in the entire mass of lake's water from 1973 to 2023, 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 de développement des diatomées.

La concentration moyenne annuelle entre 0-30m en 2023 est de  $0.71 \text{ mgSiO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ , soit une légère augmentation par rapport à 2022. Elle est élevée à l'issue du brassage et diminue progressivement avec le développement phytoplanctonique pour atteindre une valeur minimale de  $0.38 \text{ mgSiO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$  pendant l'été 2023. 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 de la silice présente dans le haut de l'hypolimnion, entraînant une nouvelle hausse des teneurs en silice en surface du lac.

D'après la Figure 12, la silice augmente au fond du lac depuis le dernier brassage, on atteint des concentrations record depuis quelques années. En surface (0-30m) les concentrations sont stables (bien que fluctuantes à l'échelle annuelle) mais relativement faibles par rapports aux concentrations observées dans les années 80. Ceci indiquerait que la succession des brassages hivernaux partiels entraînerait des conséquences sur la mise à disponibilité de la silice, cette dernière resterait piégée dans les couches profondes de l'hypolimnion. Ce changement dans la disponibilité de la silice pourrait entraîner des conséquences sur la composition taxonomique du phytoplancton, soit une baisse de l'abondance des diatomées.

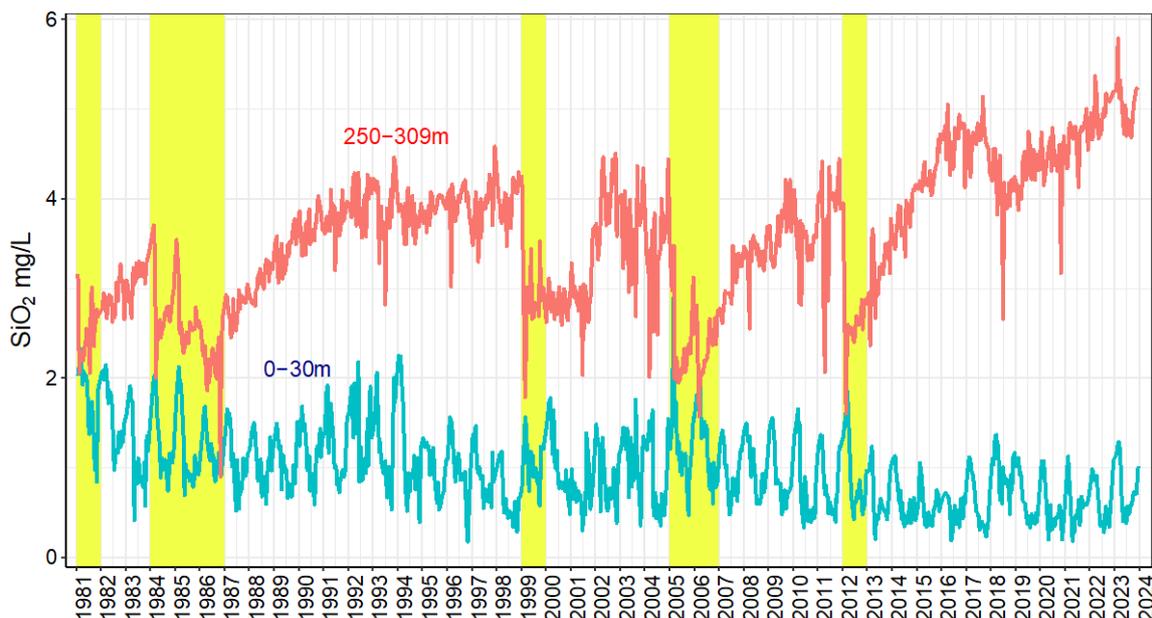


Figure 12. Concentration moyenne pondérée en silice (SiO<sub>2</sub>) dans la couche 0 - 30 m et la couche profonde (250 – 309 m), Léman - Grand Lac (SHL2) de 1981 à 2023. Les barres en jaune représentent les hivers qui ont conduit à une homogénéisation de la colonne d'eau (soit par l'effet de mélange convective ou d'écoulements de densité).

Figure 12. Concentration of silica (SiO<sub>2</sub>) in the 0-30m layer and bottom layer (250 – 309m), Lake Geneva - Grand Lac (SHL2) from 1981 to 2023. The yellow shades represent winters when the water column has been homogenized (due to convective mixing and density currents).

#### 5.4. CHLORURE

Après une période de stabilisation entre 2016 et 2021, les concentrations des ions chlorures dans le Léman reprennent leur augmentation (Figure 13). En 2023, le stock de chlorure est égal à 928 000 tonnes, soit une moyenne annuelle pondérée de 10.79 mg·L<sup>-1</sup> contre 920 000 tonnes (soit 10.70 mg·L<sup>-1</sup>) en 2022.

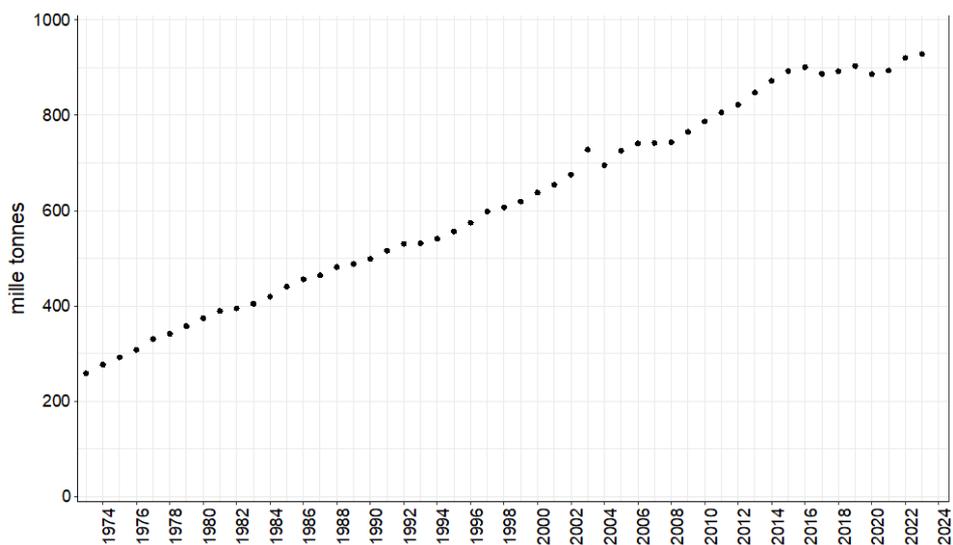


Figure 13. Évolution du stock de chlorures pour l'ensemble de la masse d'eau du lac de 1973 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2)

Figure 13. Change in stock of chloride in the entire mass of lake's water from 1973 to 2023, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

## BIBLIOGRAPHIE

- Anneville O., C. Kaiblinger, R.D. Tadonlélé, J.-C. Druart et Dokulil M.T. (2008). Contribution of Long-term monitoring to the European Water Framework Directive implementation. Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference, Sengupta M. & Dalwani R. (Ed.), 1122-1131
- OEaux (1998) : Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (Suisse).
- POURRIOT, Roger et MEYBECK, Michel. Limnologie générale. 1995 - chapitre Production primaire autotrophe p 228 – 252
- SCHWEFEL, Robert, GAUDARD, Adrien, WÜEST, Alfred, *et al.* Effects of climate change on deepwater oxygen and winter mixing in a deep lake (Lake Geneva): Comparing observational findings and modeling. *Water Resources Research*, 2016, vol. 52, no 11, p. 8811-8826.
- SOERE OLA-IS, AnaEE-France, INRAE Thonon-les-Bains, 2023, developed by Eco-Informatics ORE INRAE Team
- Wetzel, R. G. (2001). Limnology: lake and river ecosystems. gulf professional publishing.

## ANNEXE 1. VOLUME DES STRATES D'EAU

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. Les volumes des strates ont changé durant différentes périodes : entre 1957 et 1976, de 1976 à 1980, de 1981 à 1990, de 1991 à 1992, de 1993 à 2001, et depuis 2002. Ces variations sont dues à des modifications dans les protocoles de collecte et aux ajustements des profondeurs d'échantillonnage qui y sont associés.

Tableau 2. Volume des strates des couches d'eau

Table 2. Volume of water layer strata

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. CONCENTRATIONS ANNUELLES PONDÉRÉES DE 1957 À 2023

Tableau 3. Concentrations annuelles moyennes pondérées de 1957 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2). Calcul à partir des données extraites de la SOERE SI-OLA selon les coefficients de pondérations dans l'Annexe 1

Tableau 3. Mean annual weighted concentrations from 1957 to 2023, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2). Calculation based on database extracted from, SOERE OLA-IS according to ponderation coefficient in Annexe 1

Année	Oxygène	Ptot	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ntot	Σ Nmin	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	COP	NOP	Ppart	Transparence	
	mg·L <sup>-1</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	mgCl·L <sup>-1</sup>	µgC·L <sup>-1</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	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 <sup>b</sup>	13.4 <sup>b</sup>	2.02	6.78	4.28
2003	8.60	32.80	27.76	634.39	578.68	3.71	575.07	8.47	93.2	13.77	2.32	6.71	4.86
2004	9.16	29.51	26.06	685.02	611.55	3.03	608.07	8.08	98.5	15.70	2.58	6.82	5.95
2005	9.28	29.41	24.08	628.08	588.75	3.79	584.73	8.44	128.5	22.03	2.96	6.14	5.36
2006	9.80	27.68	22.63	655.90	590.33	2.80	586.72	8.61	109.3	19.04	2.43	7.12	6.83
2007	9.00	25.78	20.94	665.25	593.89	3.76	590.15	8.63	114.7	17.57	2.42	6.40	5.33
2008	8.84	27.72	21.47	634.96	530.55	3.73	525.71	8.65	103.5	11.66	2.14	8.04	6.20
2009	9.30	22.82	19.38	605.24	472.54	4.39	468.35	8.90	114.3	11.34	1.78	7.26	5.94
2010	9.18	22.37	19.36	626.72	503.40	3.71	498.35	9.15	110.0	8.74	2.05	6.83	5.52
2011	8.96	22.62	19.66	569.53	462.87	4.66	457.37	9.37	86.6	9.72	2.05	6.84	6.42
2012	9.25	21.63	16.87	568.42	470.84	5.70	462.95	9.56	99.7	10.13	2.62	6.47	4.24
2013	9.20	19.79	17.09	624.52	597.08	3.83	592.33	9.86	92.5	9.40	2.22	7.71	7.00
2014	8.55	20.52	16.75	619.85	576.48	3.79	571.51	10.14	95.9	10.65	2.02	7.57	5.83
2015	8.53	19.03	15.84	635.13	581.96	4.89	575.48	10.38	100.9	8.78	2.09	8.56	6.94
2016	8.07	19.02	15.82	648.79	732.01	4.66	725.91	10.48	91.5	8.36	1.91	7.40	6.05
2017	8.21	17.75	14.79	667.02	573.17	3.55	568.11	10.31	96.6	12.05	1.99	8.63	6.48
2018	8.57	19.90	14.49	696.21	571.97	3.95	566.38	10.37	79.73	11.6	2.28	6.70	4.56
2019	8.58	16.21	11.93	667.08	548.31	4.27	542.73	10.50	72.92	13.1	2.19	8.20	7.05
2020	8.02	16.92	13.05	672.41	547.19	3.89	541.86	10.30	77.43	13.2	2.60	8.06	7.56
2021	8.10	16.00	12.17	652.56	556.46	5.52	549.26	10.39	84.05	14.1	2.09	6.80	5.10
2022	8.01	16.90	13.45	665.98	572.02	5.05	565.64	10.70	75.15	12.3	2.43	9.83	8.85
2023	7.92	16.87	12.98	701.66	576.24	3.86	570.55	10.79	72.77	11.1	2.05	6.98	5.30

<sup>b</sup> : valeurs interpolées

### ANNEXE 3. STOCKS ANNUELS EN TONNES DE 1957 À 2023

Tableau 4. Stocks annuels en tonnes de 1957 à 2023, Léman - Grand Lac (SHL2)

Tableau 4. Annual total content in metric tons from 1957 to 2023, Lake Geneva - Grand Lac (SHL2)

Année	Oxygène	Ptot	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ntot	Nmin	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	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 <sup>b</sup>	173	1154 <sup>b</sup>
2003	739242	2821	2387	54558	49766	319	49456	728063	8019	199	1184
2004	787556	2538	2241	58912	52594	261	52294	695142	8469	222	1350
2005	798444	2529	2071	54015	50633	326	50287	725507	11054	254	1894
2006	842395	2381	1946	56408	50769	241	50458	740676	9402	209	1637
2007	773780	2217	1801	57211	51074	323	50753	741952	9861	208	1511
2008	760175	2384	1847	54607	45627	321	45211	743509	8897	184	1003
2009	799905	1962	1667	52050	40639	377	40278	765090	9832	153	976
2010	789390	1924	1665	53898	43293	319	42858	787041	9462	176	751
2011	770351	1945	1690	48980	39807	401	39334	805638	7450	177	835
2012	795700	1860	1451	48884	40492	491	39814	822136	8575	225	872
2013	790938	1702	1469	53708	51349	329	50941	847951	7952	191	808
2014	735592	1765	1440	53307	49578	326	49150	871926	8248	174	916
2015	733428	1637	1363	54621	50049	421	49491	893011	8675	180	755
2016	694048	1636	1361	55796	62953	400	62429	900917	7865	165	719
2017	706053	1527	1272	57364	49293	306	48857	886772	8312	171	1036
2018	737418	1712	1246	59874	49189	340	48709	891953	6857	196	995
2019	737713	1394	1026	57369	47154	367	46675	903380	6271	188	1124
2020	689356	1456	1123	57827	47058	335	46600	886212	6659	224	1139
2021	696223	1376	1047	56120	47855	475	47236	893750	7228	180	1211
2022	688645	1454	1157	57274	49194	434	48645	920275	860	209	860
2023	682112	1451	1117	60343	49557	332	49067	928299	6258	957	176

<sup>b</sup> : valeurs interpolées

## ANNEXE 4. INCERTITUDES ÉLARGIES DES PRINCIPALES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

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 <sup>-1</sup>	1.8
χ	S·cm <sup>-1</sup>	1.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	5.1
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	µgN·L <sup>-1</sup>	11.2
Ntot	µgN·L <sup>-1</sup>	10.9
NOP	µgN·L <sup>-1</sup>	6.0
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	µgP·L <sup>-1</sup>	6.2
Ptot	µgP·L <sup>-1</sup>	8.4
Ppart	µgP·L <sup>-1</sup>	8.0
COP	µgC·L <sup>-1</sup>	3.0
Cl <sup>-</sup>	mgCl <sup>-</sup> ·L <sup>-1</sup>	4.4
SiO <sub>2</sub>	mgSiO <sub>2</sub> ·L <sup>-1</sup>	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

### INTRODUCTION

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

*Rappel : MétéoSuisse, ainsi que MétéoFrance utilisent une période de référence de 30 ans pour classer les événements météorologiques actuels. Le choix de cette période dite de référence est basé sur les spécifications de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). La période de référence, utilisée à partir de janvier 2021 est 1991-2020.*

### TEMPÉRATURE DE L'AIR

En 2023, les températures moyennes mensuelles sont toutes supérieures à leurs normales, hormis pendant le mois d'avril. (Tableau 1.1, Figure 1.1).

Tableau 1.1. Température moyenne mensuelle de l'air à chaque station en 2023 (°C)

Table 1.1. Monthly air temperature average for each station in 2023 (°C)

	Genève	Changins	Pully	Thonon-les-Bains	Inter-stations 1991 - 2020
Janvier	3.9	3.4	3.8	4.3	2.6
Février	3.8	4.2	4.9	4.9	3.2
Mars	8.2	7.7	8.0	8.5	6.9
Avril	9.7	9.3	9.6	9.8	10.5
Mai	15.4	15.1	15.3	15.4	14.6
Juin	21.0	20.5	21.1	21.0	18.4
Juillet	22.6	22.0	22.1	22.5	20.6
Août	22.1	21.9	22.0	22.3	20.2
Septembre	19.1	19.0	19.4	19.7	16.0
Octobre	14.0	13.7	14.7	15.0	11.6
Novembre	7.1	6.8	7.6	8.1	6.5
Décembre	4.9	5.0	5.6	6.2	3.3
<b>Moyenne</b>	<b>12.7</b>	<b>12.4</b>	<b>12.8</b>	<b>13.1</b>	<b>11.2</b>

En 2023, la température moyenne annuelle inter-stations est de 12.8 °C. L'année 2023 se classe donc au second rang (sur 33) de la chronique 1991 - 2023 (la 1<sup>ère</sup> étant 2022 avec 12.9 ; la dernière étant 1996 avec 10.2 °C) (Tableau 1.2, Figure 1.2).

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

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

Années	Température moyenne annuelle	Années	Température moyenne annuelle
1990	11.2	2007	11.4
1991	10.4	2008	10.9
1992	10.9	2009	11.3
1993	10.4	2010	10.3
1994	11.9	2011	11.8
1995	10.9	2012	11.1
1996	10.2	2013	10.3
1997	11.1	2014	11.7
1998	11.0	2015	11.7
1999	11.0	2016	11.2
2000	11.6	2017	11.5
2001	11.0	2018	12.3
2002	11.5	2019	11.8
2003	11.7	2020	12.3
2004	11.0	2021	11.0
2005	10.6	2022	12.9
2006	11.3	2023	12.8

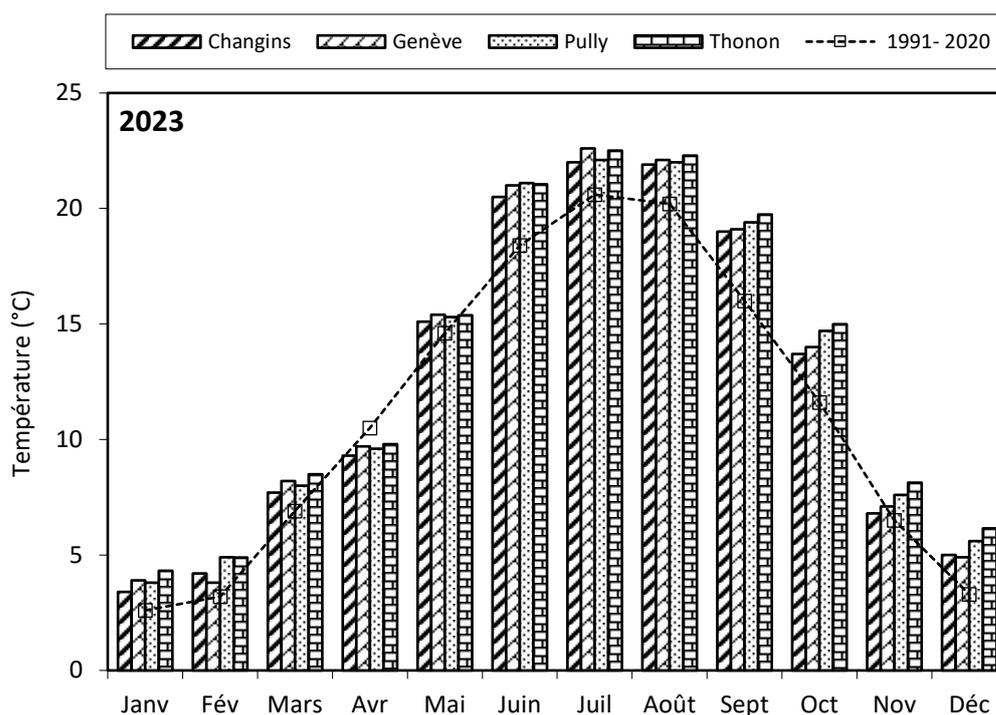


Figure 1.1. Moyenne mensuelle de la température de l'air de chaque station en 2023 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe)

Figure 1.1. Mean monthly of air temperature at each station in 2023 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve)

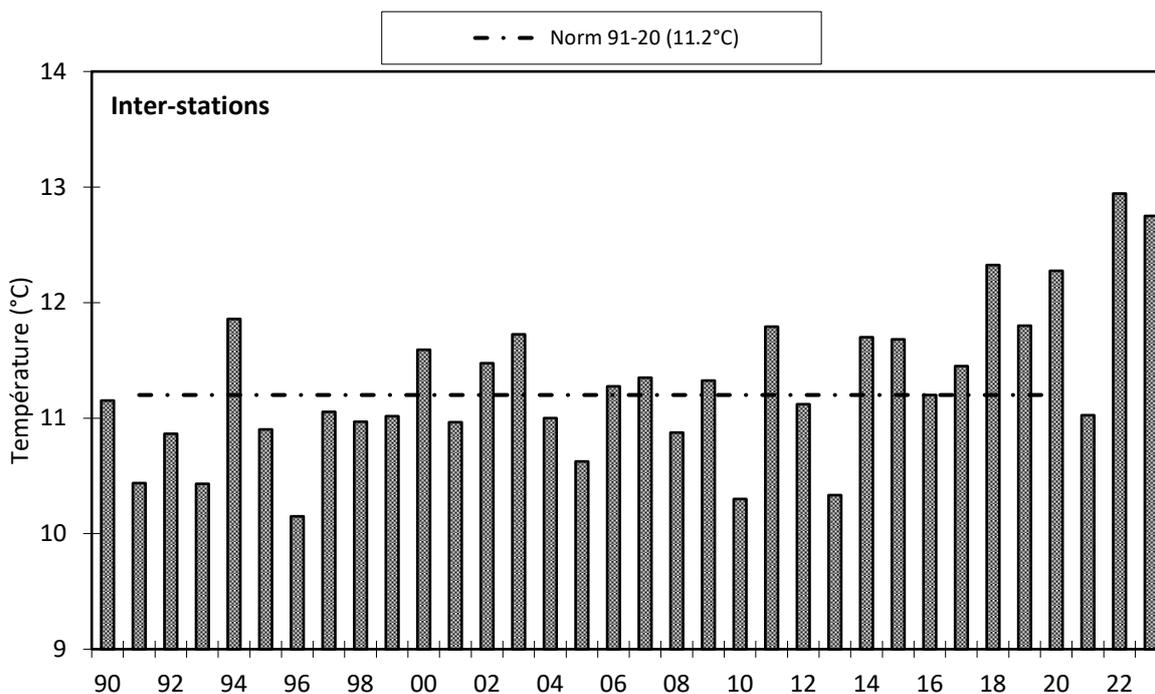


Figure 1.2. Température moyenne annuelle de l'air pour l'inter-station (°C)

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

### PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie de l'année 2023 sur le bassin lémanique est de 1'152.0 mm, soit 146 mm supérieur à la normale inter-stations (1'006.2 mm) relevée sur les 4 stations entre 1991 et 2020. Pully est la station la plus arrosée avec 1'304.7 mm, Genève avec 1'016.4 mm à les précipitations les moins importantes (Tableau 2.1, Figure 2.1).

Si l'ensemble de la pluviométrie de 2023 avait été comme celle des huit premiers mois (-175 mm par rapport à la normale), l'année aurait été en déficit. Ce sont surtout la pluviométrie des quatre derniers mois (moyenne de l'inter-stations 695 mm, soit +321 mm par rapport à la normale) qui font de 2023 une année excédentaire (+ 14.5%).

Tableau 2.1. Pluviométrie mensuelle (mm) à chaque station en 2023

Table 2.1. Monthly rainfall (mm) at each station in 2023

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Inter-stations 1991 - 2020
<b>Janvier</b>	70.3	79.4	86.9	83.0	72.7
<b>Février</b>	0.5	1.2	3.1	2.5	58.5
<b>Mars</b>	89.3	78.4	85.3	88.5	64.4
<b>Avril</b>	51.4	67.8	90.1	70.0	73.0
<b>Mai</b>	18	32.8	57.7	35.0	92.6
<b>Juin</b>	74.2	92.7	36.1	59.0	91.0
<b>Juillet</b>	31.7	26.6	67.2	45.0	88.3
<b>Août</b>	69.5	60.0	83.5	90.5	91.5
<b>Septembre</b>	98.2	100.7	169.9	138.5	90.1
<b>Octobre</b>	200.2	194.9	195.2	170.5	100.2
<b>Novembre</b>	192.2	227.8	254	225.0	91.8
<b>Décembre</b>	120.9	159.9	175.7	157.0	92.1
<b>Total Annuel</b>	1'016.4	1'122.2	1'304.7	1'164.5	1'006.2

En inter-stations, l'année 2023 se classe au 6<sup>e</sup> rang (sur 33) de la chronologie pluviométrique 1991 - 2023 (la 1<sup>ère</sup> étant 2001 avec 1'299 mm, la dernière étant 2011 avec 750 mm) (Tableau 2.2, Figure 2.2).

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

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

Années	Pluviométrie total annuel	Années	Pluviométrie total annuel
1991	1'093.9	2007	1'135.7
1991	860.3	2008	1'047.8
1992	1'057.8	2009	849.9
1993	1'060.5	2010	815.5
1994	1'124.1	2011	750.1
1995	1'194.7	2012	1'092.3
1996	972.8	2013	1'219.0
1997	1'022.9	2014	1'068.1
1998	924.6	2015	808.7
1999	1'266.0	2016	1'115.0
2000	1'028.2	2017	833.7
2001	1'298.7	2018	916.9
2002	1'169.5	2019	1'004.1
2003	760.6	2020	971.1
2004	980.0	2021	1'104.3
2005	775.1	2022	823.6
2006	1'069.2	2023	1'152.0

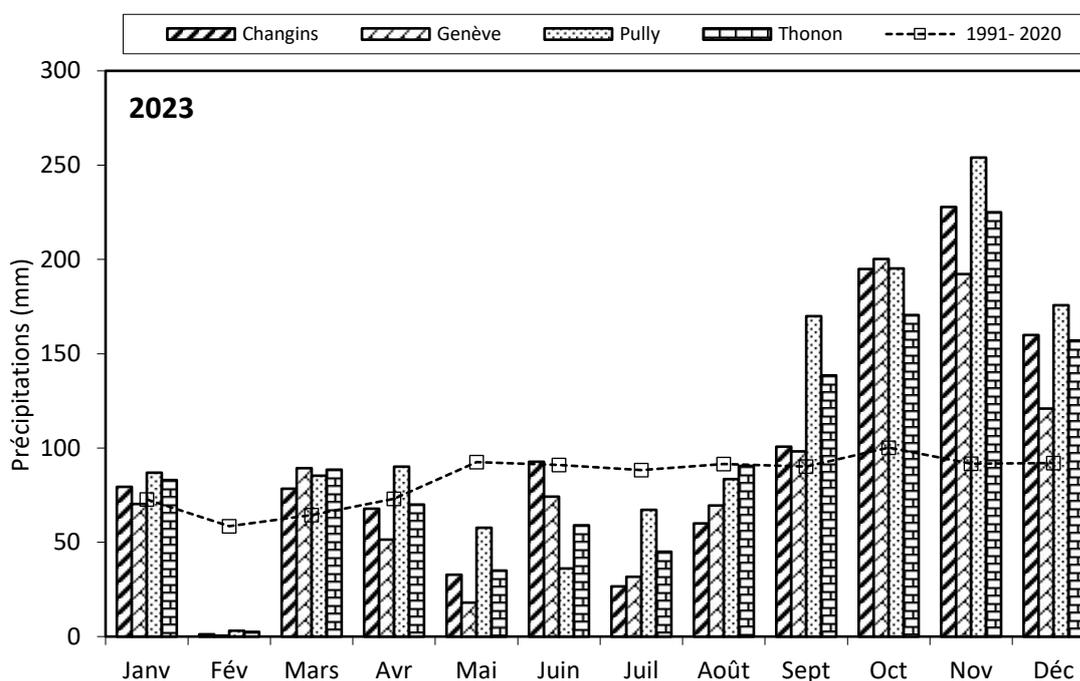


Figure 2.1. Pluviométrie mensuelle de chaque station en 2023 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe)

Figure 2.1. Monthly rainfall at each station in 2023 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve)

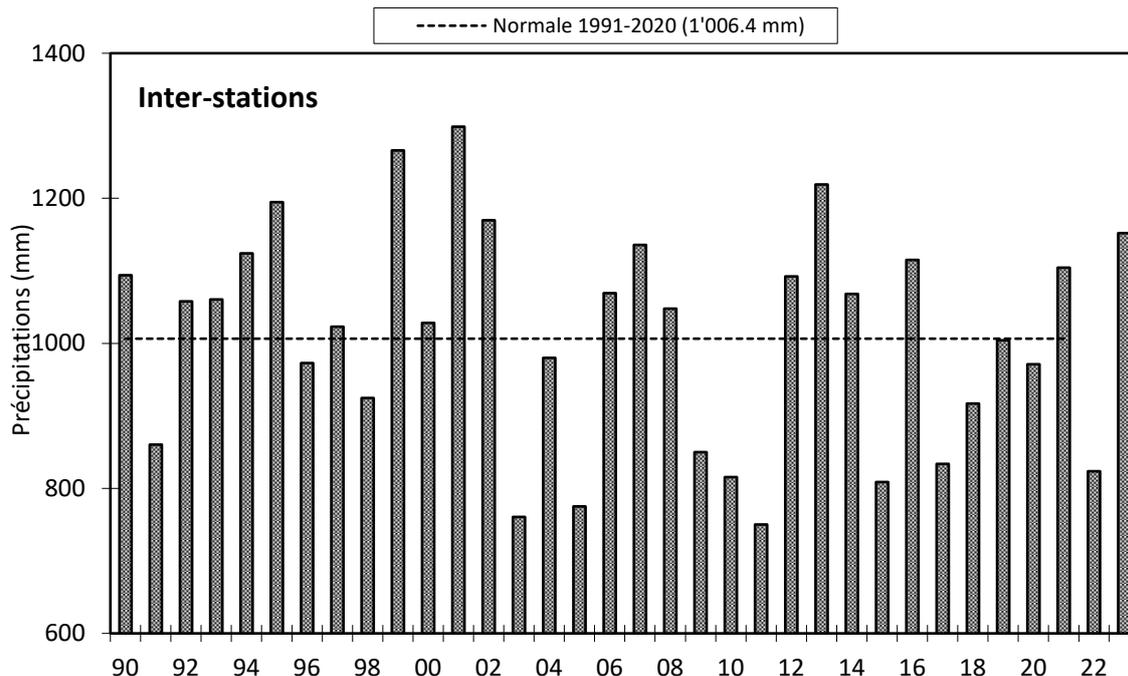


Figure 2.2. Pluviométrie annuelle pour l'inter-stations (mm)

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

## INSOLATION

L'insolation mesurée lors du mois de février (+78 h) fut excédentaire, à contrario, de celle du printemps (mars, avril, mai) fut déficitaire (-76 h). Les mois juin, septembre et octobre furent excédentaires (Tableau 3.1, Figure 3.1). Par rapport à la normale inter-stations l'excédent est sur l'année de 133.3 heures soit 6.8%

Tableau 3.1. Insolation mensuelle à chaque station en 2023 (h)

Table 3.1. Monthly insolation at each station in 2023 (h)

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Inter-stations 1991 - 2020
Janvier	55.4	59.7	68.7	45.1	66.4
Février	183.1	193.1	181.1	166.0	102.4
Mars	126.3	141.7	122.9	141.2	168.5
Avril	134.9	144.9	154.7	173.4	195.4
Mai	211.4	216.3	202.6	261.3	220.0
Juin	297.2	294.4	305.9	329.5	250.2
Juillet	276.4	264.9	258.7	307.1	269.4
Août	218.1	207.7	208.4	244.7	243.9
Septembre	259.1	273.4	254.2	241.0	189.4
Octobre	158.9	165.1	155.1	149.4	124.1
Novembre	63.1	69.1	52.4	41.6	70.2
Décembre	75.4	77.6	74.2	30.4	51.0
Total annuel	<b>2'059.3</b>	<b>2'107.9</b>	<b>2'038.9</b>	<b>2'130.7</b>	<b>1'950.9</b>

L'année 2023 avec une moyenne inter-stations de 2'084.2 heures est une année ensoleillée. Elle se classe neuvième sur la période 1991 - 2023 (la première étant 2022 avec 2'361.5 heures, la dernière étant 1993 avec 1'669.2h). (Tableau 3.2, Figure 3.3).

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

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

Années	Insolation total annuel	Années	Insolation total annuel
1990	1'946.1	2007	2'096.7
1991	1'870.0	2008	1'961.9
1992	1'676.1	2009	2'028.4
<b>1993</b>	<b>1'669.2</b>	2010	1'817.3
1994	1'707.5	2011	2'203.0
1995	1'896.5	2012	2'008.4
1996	1'769.3	2013	1'813.2
1997	1'948.4	2014	1'902.8
1998	1'981.7	2015	2'043.9
1999	1'770.1	2016	1'847.7
2000	1'998.9	2017	2'089.5
2001	1'837.6	2018	2'042.3
2002	1'828.6	2019	2'152.8
2003	2'290.5	2020	2'150.6
2004	2'000.1	2021	1'994.3
2005	2'138.4	<b>2022</b>	<b>2'361.5</b>
2006	1'992.4	<b>2023</b>	<b>2'084.2</b>

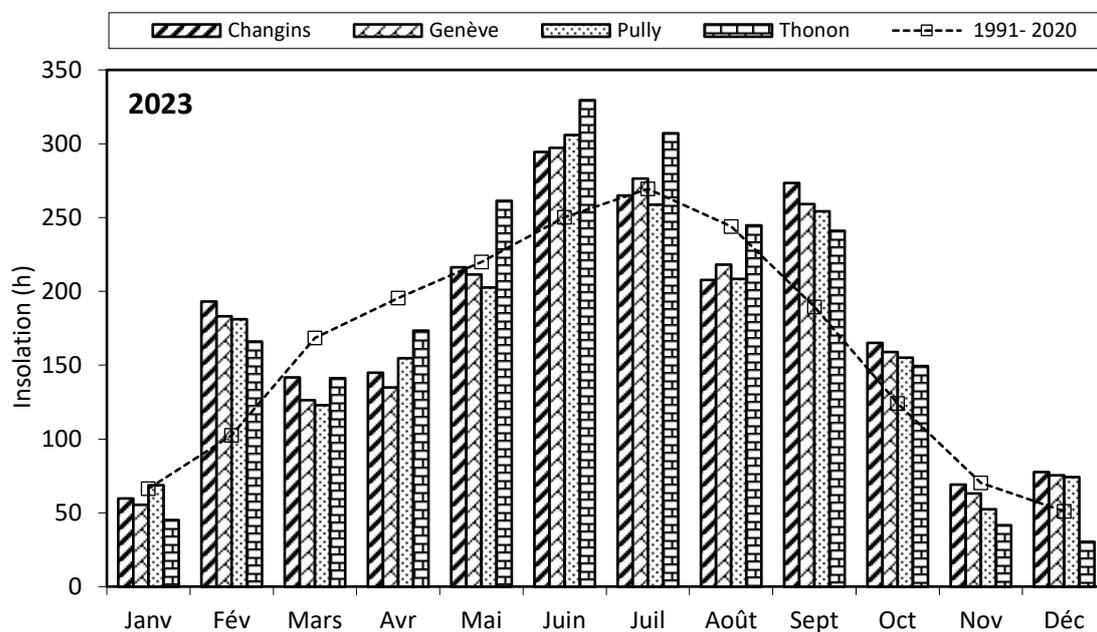


Figure 3.1. Moyenne mensuelle de l'insolation de chaque station en 2023 (histogramme) et celle de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe)

Figure 3.1. Monthly insolation at each station in 2023 (histogram), and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve)

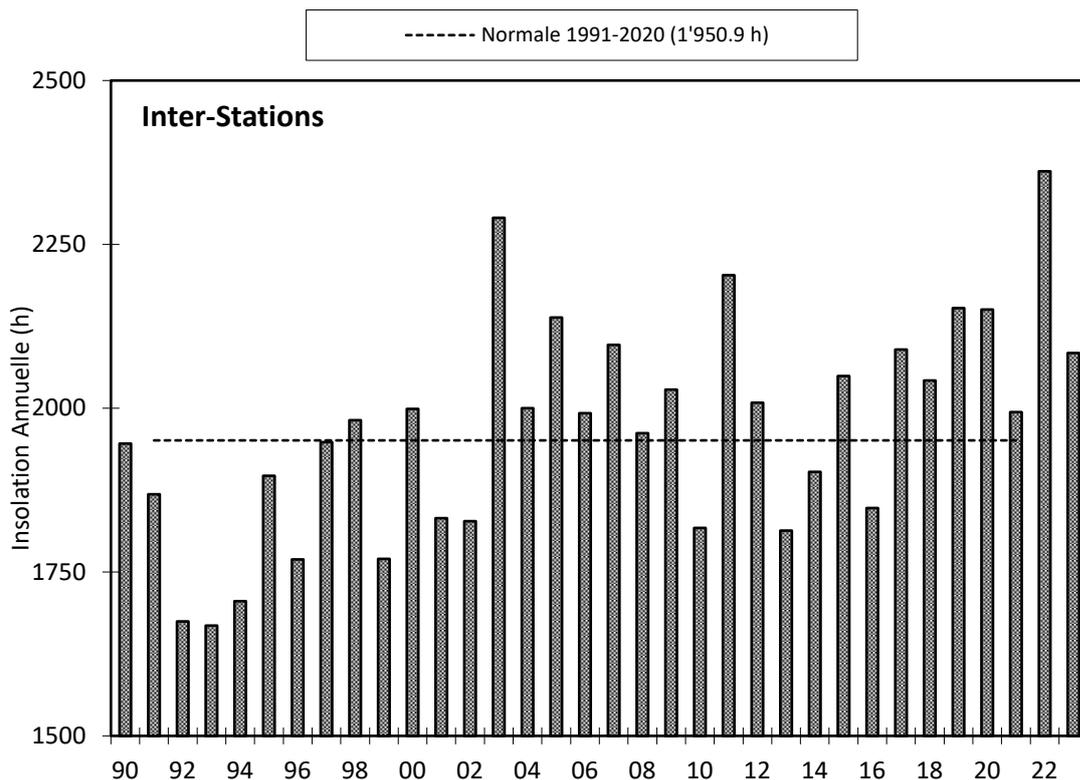


Figure 3.2 Insolation annuelle de l'inter-stations

Figure 3.2 Annual insolation at the inter-stations

## RAYONNEMENT

La moyenne inter-stations pour l'année 2023 est de 13.3 MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> (Tableau 4.1, Figure 4.1)

Tableau 4.1 Rayonnement global mensuel à chaque station en 2023 (moyenne journalière en MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)

Table 4.1 Global monthly solar irradiation at each station in 2023 (mean daily irradiation in MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)

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

Pour l'inter-stations en 2023, le rayonnement global annuel obtenu est de 4'849. MJ·m<sup>-2</sup>, ce qui classe l'année, dixième sur la période 1991 – 2023 (Tableau 4.2, Figure 4.2).

Tableau 4.2 Rayonnement global annuel en inter-stations (MJ·m<sup>-2</sup>)

Table 4.2 Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ·m<sup>-2</sup>)

Années	Rayonnement global total annuel	Années	Rayonnement global total annuel
1990	4'401	2007	4'671
1991	4'415	2008	4'486
1992	4'219	2009	4'837
1993	4'126	2010	4'575
<b>1994</b>	<b>4'100</b>	2011	5'000
1995	4'339	2012	4'747
1996	4'310	2013	4'547
1997	4'405	2014	4'653
1998	4'378	2015	4'869
1999	4'188	2016	4'584
2000	4'488	2017	4'923
2001	4'310	2018	4'922
2002	4'337	2019	4'981
2003	4'894	2020	4'995
2004	4'858	2021	4'840
2005	4'712	<b>2022</b>	<b>5'243</b>
2006	4'593	<b>2023</b>	<b>4'849</b>

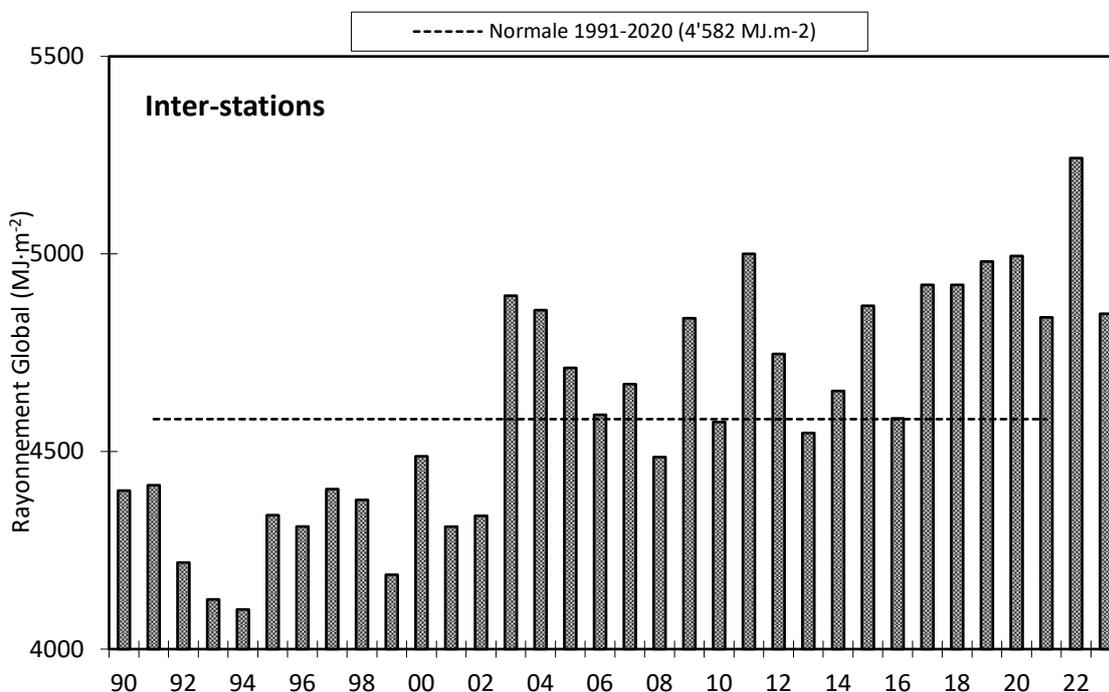


Figure 4.1 Moyenne mensuelle du rayonnement global de chaque station en 2023 (histogrammes) et de l'inter-stations pendant la période 1991 - 2020 (courbe)

Figure 4.1 Mean monthly global solar irradiation at each station in 2023 (histogram) and the mean inter-stations value for the period 1991 - 2020 (curve)

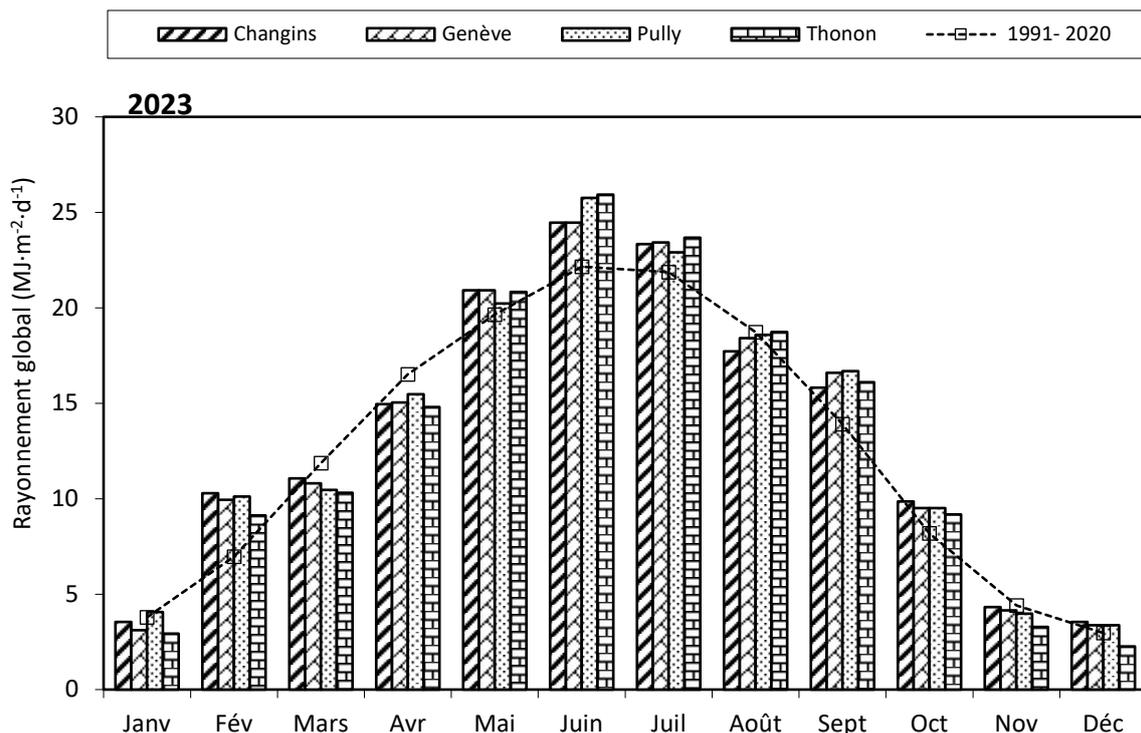


Figure 4.2 Rayonnement global annuel de l'inter-stations (MJ·m<sup>-2</sup>)

Figure 4.2 Global annual solar irradiation at the inter-stations (MJ·m<sup>-2</sup>)

## VENT

### Vitesse du vent

En 2023 à Changins, station de référence, les mois de janvier et novembre furent venteux (+0.9 et +0.7 m·s<sup>-1</sup> par rapport la normale 1991-2020). Le mois de septembre lui fut plutôt calme. Dans l'ensemble, l'année 2023 peut être considérée comme normale (tableau 5.1, figure 5.1 et tableau 5.2).

Tableau 5.1 Moyenne mensuelle de la vitesse du vent en 2023 (m·s<sup>-1</sup>)

Table 5.1 Monthly mean of wind speeds in 2023 (m·s<sup>-1</sup>)

	Genève	Changins	Pully	Thonon	Changins 1991-2020
Janvier	3.1	3.4	1.8	1.9	2.5
Février	2.4	2.7	1.9	1.8	2.8
Mars	3.2	3.2	1.7	1.5	3.1
Avril	3.0	3.0	2.0	1.6	3.0
Mai	2.8	3.0	1.9	1.4	2.8
Juin	2.1	2.4	1.7	0.9	2.6
Juillet	2.6	2.7	2.0	1.4	2.6
Août	2.4	2.6	1.8	1.3	2.6
Septembre	1.7	2.0	1.9	0.8	2.4
Octobre	2.4	2.3	1.4	1.2	2.3
Novembre	3.0	3.0	1.6	1.6	2.3
Décembre	2.2	2.5	1.5	1.1	2.5
<b>Moyenne annuelle</b>	<b>2.6</b>	<b>2.7</b>	<b>1.8</b>	<b>1.4</b>	<b>2.6</b>

Pour l'année 2023 à Changins, il a été enregistré 26 jours de vent fort (> 5 m·s<sup>-1</sup>) dont 22 jours durant le 1<sup>er</sup> semestre. Le maximum de vent moyen journalier pour l'année 2023 a été relevé le 26 février avec la vitesse de 13.1 m·s<sup>-1</sup> (Figure 5.2).

Tableau 5.2 Vent moyen annuel à Changins ( $m \cdot s^{-1}$ )

Table 5.2 Mean annual wind speed at Changins ( $m \cdot s^{-1}$ )

Années	Vent moyen annuel	Années	Vent moyen annuel
1990	3.1	2007	2.7
<b>1991</b>	<b>3.2</b>	2008	2.5
1992	2.8	2009	2.6
1993	2.9	2010	2.6
1994	2.7	<b>2011</b>	<b>2.2</b>
1995	2.9	2012	2.6
1996	2.7	2013	2.4
1997	2.5	2014	2.3
1998	3.0	2015	2.5
1999	2.9	2016	2.4
2000	2.6	2017	2.5
2001	2.8	2018	2.6
2002	2.6	2019	2.6
2003	2.3	2020	2.6
2004	2.4	2021	2.7
2005	2.2	2022	2.5
2006	2.4	<b>2023</b>	<b>2.7</b>

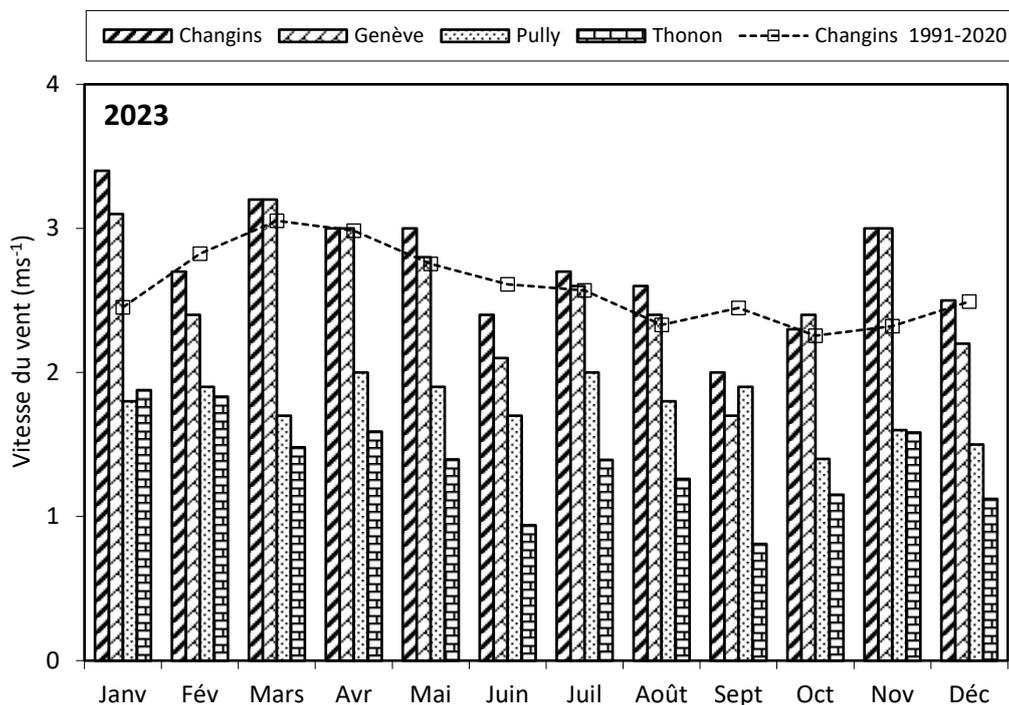


Figure 5.1 Moyenne mensuelle de la vitesse de vent de chaque station en 2023 (histogramme) et celle de Changins pendant la période 1991 - 2020 (courbe)

Figure 5.1 Wind speed monthly averages at each station in 2023 (histogram), and at Changins for the period 1991 - 2020 (curve)

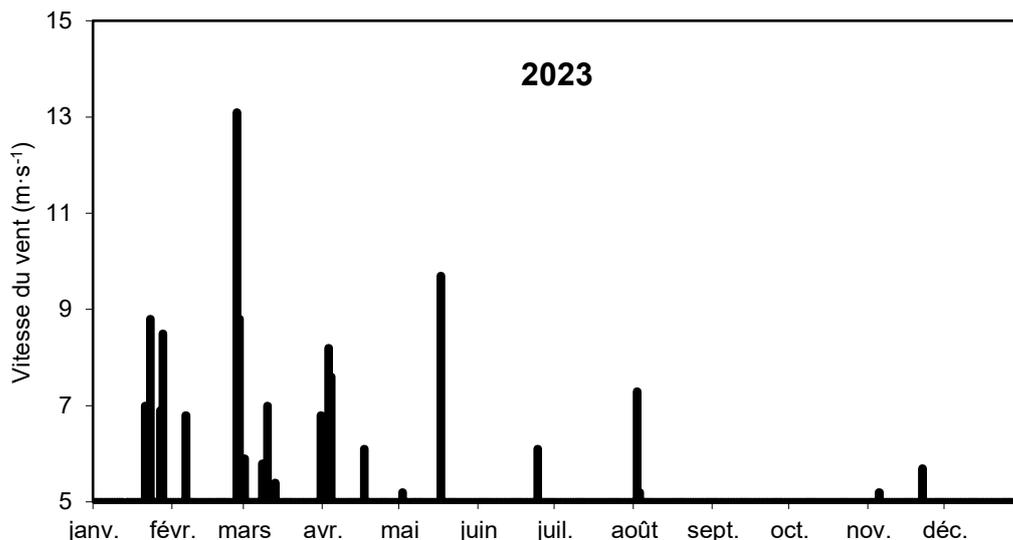


Figure 5.2 Répartition annuelle en 2023 des vents forts (> 5 m·s<sup>-1</sup>) à Changins  
 Figure 5.2 Annual distribution in 2023 of winds (> 5 m·s<sup>-1</sup>) at Changins

### Rose des vents

Pour l'année 2023 à Changins, 66.5 % des vents (Figure 5.3) se répartissent selon le demi-cercle S-O-N. 67.8 % des vents enregistrés ont une vitesse entre 0 et 3 m·s<sup>-1</sup>. Les vents qui sont supérieurs à 5 m·s<sup>-1</sup> représentent 14 % des vents totaux, 41.8 % de ceux-ci sont d'origine N-E ; et 49.1 % sont d'origine opposée S-O.

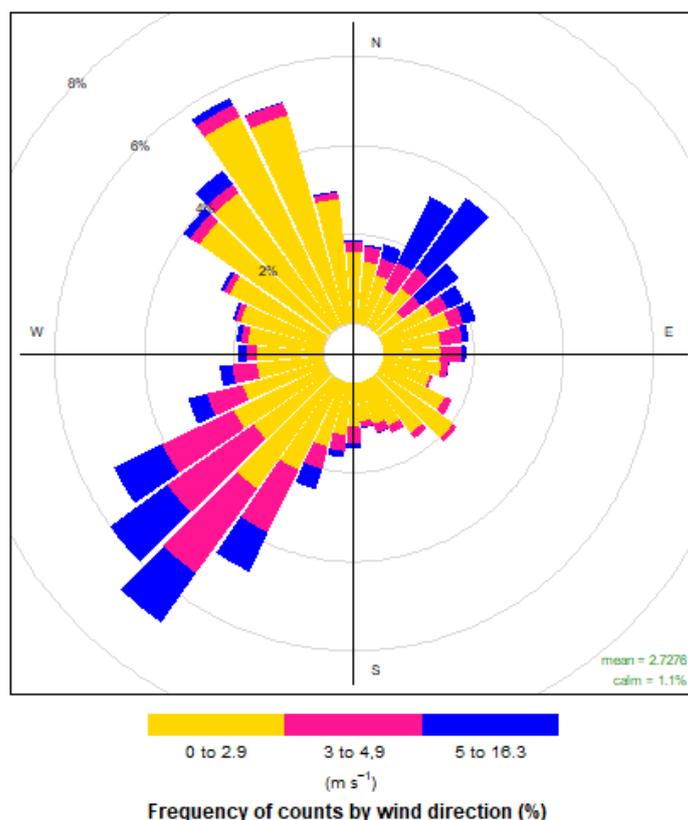


Figure 5.3 Rose des vents à Changins en 2023 (pourcentage d'occurrence des vents horaires par direction et par classe de force)  
 Figure 5.3 Wind rose at Changins in 2023 (frequency of hourly wind direction occurrence by strength)