

## ÉTENDUE DE LA ZONE HYPOXIQUE AU FOND DU LÉMAN

### EXTENSION OF THE HYPOXIC ZONE AT THE BOTTOM OF LAKE GENEVA

CAMPAGNE 2024

PAR

Jean-Philippe JENNY, Didier JEZEQUEL, Jean-Christophe HUSTACHE, Frédéric SOULIGNAC

UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC, INRAE, CARTEL, 74200 THONON-LES-BAINS, FRANCE

#### RÉSUMÉ

*La concentration en oxygène dans l'eau est une variable déterminante pour la vie aquatique. Or, une succession d'hivers doux a entravé le brassage complet des eaux du Léman depuis 13 ans, limitant ainsi le mélange des eaux superficielles avec les eaux profondes et diminuant la recharge annuelle en oxygène de l'hypolimnion. Cette faible recharge n'a en outre pas permis de compenser la demande biologique et chimique en oxygène, conduisant à la mise en place de l'hypoxie et au dépassement (négatif) automnal des seuils de qualité en Suisse fixés à 4 mg/L. Malgré ces développements récurrents de l'hypoxie observés grâce aux suivis au point central du lac (SHL2), très peu d'informations sont encore disponibles pour caractériser l'étendue spatiale des masses d'eau hypoxiques. Dans cette étude, huit profils verticaux de mesures physico-chimiques ont été réalisés sur autant de stations dans la colonne d'eau suivant un transect à l'automne 2024 en complément des deux transects de 2022, afin de confirmer le profil de l'hypoxie dans l'hypolimnion. Les mesures conduites au moyen d'une sonde APHOX-LX indiquent que le seuil de 4 mg/L a été atteint entre les profondeurs 212 m et 245 m selon les profils étudiés, révélant une variabilité verticale importante de 33 m en 2022 et de près de 20 m en 2024. Il en résulte que la distribution horizontale des concentrations d'oxygène dissous n'est pas uniforme, mais tend plutôt à présenter une distribution incurvée : les tranches d'eau de concentration donnée tendent à remonter plus haut sur les bords du lac. Cette observation est importante car cela implique que l'étendue spatiale (et donc le volume) d'eau hypoxique est plus importante que ne le suggérait jusqu'alors les mesures réalisées au point central du lac. Les données de 2022 et 2024 montrent par ailleurs que l'extension spatiale de l'hypoxie ne peut être inférée à partir d'un unique profil central. La différence de 33 m de profondeur correspond à une erreur d'estimation de l'ordre de 10.68 % de la profondeur totale du lac. En termes de surface, cela représente 50 275 000 m<sup>2</sup>, soit 8.67 % de la surface totale, et environ  $6.05 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, soit 6.82 % du volume total. Nous recommandons ainsi de réviser l'indicateur de l'oxygénation du Léman, en intégrant la mise en œuvre d'une campagne unique d'observation annuelle, conduite à l'automne, basée sur un ensemble de profils verticaux répartis le long d'un transect, afin de suivre efficacement la dynamique spatio-temporelle de l'hypoxie dans le Léman. L'étude indique également que le protocole de suivi actuel souffre d'un manque de précision à l'interface eau-sédiment, en raison du temps de réponse actuel de la sonde utilisée. Cette limitation est compromettante pour notre compréhension des conditions d'oxygénation du fond du lac, mais aussi des effets potentiels qui en résultent notamment sur les habitats benthiques ou la charge interne en phosphore et en métaux trace. Une nouvelle sonde plus performante permet désormais d'améliorer les mesures d'oxygène dans le Léman.*

## **ABSTRACT**

*Dissolved oxygen is a key variable for aquatic life. However, a succession of mild winters has hindered full water column mixing in Lake Geneva, thereby limiting the mixing of surface and deep waters and reducing the annual oxygen recharge of the hypolimnion. This weak recharge has also failed to offset the biological and chemical oxygen demand, leading to the onset of hypoxia and the fall-time drop below the Swiss quality threshold set at 4 mg/L. Despite these recurring hypoxia events observed through monitoring at the lake's central station (SHL2), very little information is currently available to characterize the spatial extent of hypoxic water masses. In this study, eight vertical profiles of physico-chemical measurements were conducted at as many stations along two transects in autumn 2022, and nine in autumn 2024, in order to map the extent of hypoxia in the hypolimnion. Measurements carried out using an APHOX-LX probe show that the 4 mg/L threshold was reached at depths ranging from 212 m to 245 m depending on the profiles, revealing a significant vertical variability of 33 m in 2022 and nearly 20 m in 2024. This means that the horizontal distribution of dissolved oxygen concentrations is not uniform, but tends to show a curved pattern: layers of a given concentration tend to rise higher near the lake's margins. This observation is important because it implies that the spatial extent (and therefore the volume) of hypoxic water is larger than previously suggested by measurements taken only at the lake's central point. The 2022 and 2024 data also show that the spatial extent of hypoxia cannot be inferred from a single central profile. We therefore recommend implementing an annual observation campaign in autumn, based on a series of vertical profiles distributed along a transect, in order to effectively monitor the spatio-temporal dynamics of hypoxia in Lake Geneva. This study highlights a current limitation in the oxygen monitoring protocol, which is not well suited for investigating conditions at the sediment–water interface. This limitation hampers our understanding of bottom water oxygenation and its potential impacts, particularly on benthic habitats and internal phosphorus and trace metal loading. Funding was secured by CARTEL for the acquisition of a new, higher-performance instrument (APHOX-LX probe), allowing for a significant improvement in oxygen monitoring in Lake Geneva.*

## 1. INTRODUCTION

Dans les environnements marins et lacustres, l'hypoxie ( $[O_2] < 2$  mg/L selon Roberts *et al.*, 2009) devrait augmenter en étendue, en intensité et en durée (Diaz and Rosenberg, 2008; Jane *et al.*, 2021, Soares *et al.*, 2024) en réponse aux effets combinés d'apports externes en nutriments (Jenny *et al.*, 2016) et du réchauffement climatique (Jane *et al.*, 2021). L'hypoxie des plans d'eau est un problème croissant qui s'accompagne de graves conséquences pour la vie aquatique, incluant potentiellement la mort des espèces lorsque les seuils limites de tolérance sont dépassés. Au cours du siècle dernier, les apports anthropiques de nutriments dans les écosystèmes lacustres ont entraîné une augmentation de la biomasse phytoplanctonique, une intensification du métabolisme et de la respiration aérobie, conduisant à une diminution des concentrations en oxygène des eaux (Müller *et al.*, 2012; Nixon, 1995). Si cette tendance dans les apports de nutriments s'est inversée, désormais l'augmentation de la température de l'air provoque un réchauffement de l'eau (*e.g.* O'Reilly *et al.*, 2015) ce qui diminue la solubilité de l'oxygène (Deutsch *et al.*, 2011), augmente la durée de la stratification thermique, en contribuant à la diminution de l'efficacité du mélange de l'eau et du renouvellement de l'oxygène (Straile *et al.*, 2003, Soares *et al.*, 2024), et pose ainsi un nouveau défi pour l'oxygénation et la qualité des eaux du Léman.

Dans le cas du Léman, les suivis mensuels conduits depuis 1957 au point central mettent en évidence des cycles annuels de recharge hivernale en oxygène par brassage physique (Peng *et al.*, 2024) des eaux, et de diminution des concentrations lorsque les eaux sont stratifiées et que la demande biologique et chimique épuise le stock d'oxygène (Figure 1, adaptée de Jenny *et al.*, 2014, Soares *et al.*, 2024). Or les suivis au point central ne permettent pas d'estimer l'étendue exacte de la zone hypoxique. Même avec de fortes réductions des apports en phosphore (*i.e.* "réoligotrophisation"), les concentrations d'oxygène dissous en zone benthique ne sont souvent pas revenues à leurs niveaux attendus d'avant le XX<sup>e</sup> siècle (Deyle *et al.*, 2022).

Au cours des trois dernières décennies, les températures de l'eau ont augmenté de  $0.46 \pm 0.02$  °C par décennie dans l'épilimnion et de  $0.33 \pm 0.06$  °C par décennie dans l'hypolimnion (Desgué-Itier *et al.*, 2023). Conjointement, et en raison du changement thermique, la solubilité de l'O<sub>2</sub> a diminué de 0.104 mg/L par décennie ( $\pm 0.005$  mg/L) dans l'épilimnion et de 0.096 mg/L par décennie ( $\pm 0.011$  mg/L) dans l'hypolimnion (Desgué-Itier *et al.*, 2023). Il est attendu que ces modifications accentuent l'intensité et la durée de l'hypoxie au fond du lac. Par ailleurs, une étude de l'extension spatiale de l'hypoxie est nécessaire. En effet, les mesures de suivis sont conduites en un point unique ce qui oblige à faire des hypothèses et extrapolations concernant la distribution spatiale des concentrations. De plus, par mesure de sécurité, les sondes multi-paramètres du suivi limnologique au point SHL2 n'atteignent pas l'interface avec le sédiment et omettent parfois plusieurs mètres de mesures dans les couches d'eau les plus profondes.

Suite à ce constat mais aussi suite à une série d'hivers insuffisamment froids pour permettre une réoxygénation annuelle efficace des couches profondes du Grand Lac, le Conseil Scientifique a lancé en 2022 une étude autour de l'étendue de la zone hypoxique :

- Une **première campagne** a été effectuée mi-octobre **2022**, selon un transect nord-sud (N-S) et un transect est-ouest (E-O) passant par le point central SHL2 pour conduire des profils de mesure spatialisés. Cette campagne a fait l'objet d'un premier rapport scientifique de la CIPEL.
- Une **seconde campagne** a ensuite été organisée en **2024**, avec pour objectif principal de compléter les mesures dans des zones moins profondes du lac. L'enjeu était d'estimer la profondeur minimale atteinte par l'hypoxie, et donc de mieux cerner son extension maximale. Cette information n'avait pas pu être obtenue en 2022, faute de données dans les zones périphériques, justifiant ainsi la réalisation d'une nouvelle campagne.

L'objectif de ces campagnes est de cartographier l'étendue de la zone hypoxique et de localiser, dans l'espace, la profondeur à laquelle le seuil de 4 mg/L en oxygène dissous — correspondant à la norme suisse de qualité des eaux — est franchi. La campagne doit en outre aider à apprécier s'il y a lieu de compléter l'indicateur « oxygène dissous » du tableau de bord de la CIPEL avec une estimation de l'étendue de la zone  $< 4$  mg/L. Concernant la modalité de l'étendue, *i.e.* quelle est la relation entre l'épaisseur vs. profondeur de la zone hypoxique, nous avons posé l'hypothèse que la distribution spatiale de l'hypoxie serait incurvée (H1) et non pas plane (H2), en anticipant un effet de consommation de l'oxygène plus fort proche des sédiments (Figure 2).

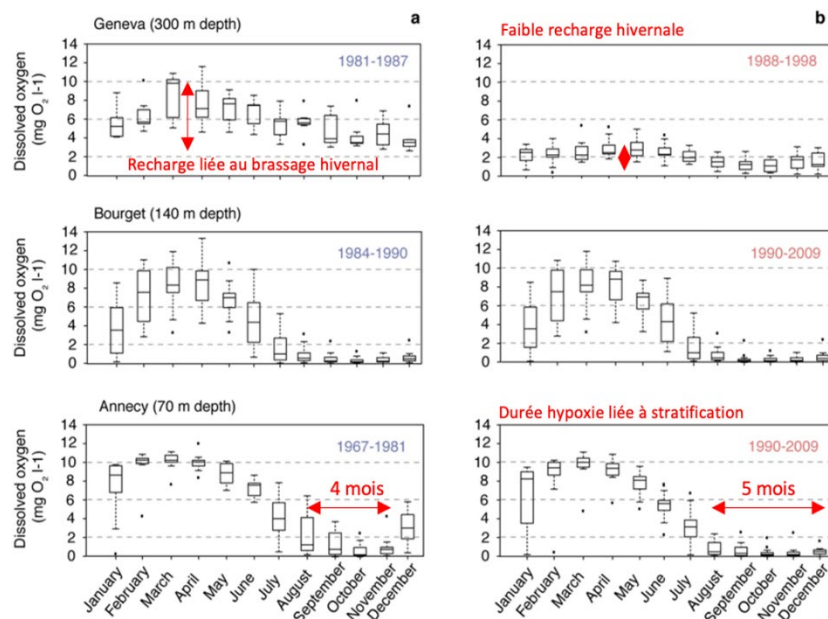


Figure 1 : a) Distribution des concentrations d'oxygène benthique sur 3 lacs périalpins de ~300, 140 et 70 m de profondeur maximale, dont le Léman (panel du haut) pour une période bien oxygénée et b) moins bien oxygénée. Cette distribution permet de mieux préciser la date stratégique de mission. À noter que, dans le cas du Léman, c'est principalement l'intensité du renouvellement du stock d'oxygène en hiver (c'est-à-dire le brassage hivernal) qui conditionne les niveaux d'oxygénation sur un cycle annuel, notamment pendant les périodes les moins oxygénées. Dans le cas du lac d'Annecy la durée de stratification semble être le facteur déterminant sur les conditions d'hypoxie à l'échelle d'une année car on observe que le nombre de mois en dessous du seuil critique de 2 mg/L varie de 4 à 5 selon les années bien ou peu oxygénées. Le lac du Bourget semble être un cas intermédiaire (Jenny et al., 2013).

Figure 1 : a) Distribution of benthic oxygen concentrations in three peri-Alpine lakes with maximum depths of ~300, 140, and 70 m, including Lake Geneva (top panel) for a well-oxygenated period and b) a less well-oxygenated period. This distribution allows for more precise determination of the strategic mission date. It should be noted that, in the case of Lake Geneva, it is mainly the intensity of oxygen stock renewal in winter (i.e., winter mixing) that determines oxygenation levels over an annual cycle, particularly during the least oxygenated periods. In the case of Lake Annecy, the duration of stratification appears to be the determining factor in hypoxia conditions over the course of a year, as the number of months below the critical threshold of 2 mg/L varies from 4 to 5 depending on whether the year is well oxygenated or poorly oxygenated. Lake Bourget appears to be an intermediate case (Jenny et al., 2013).

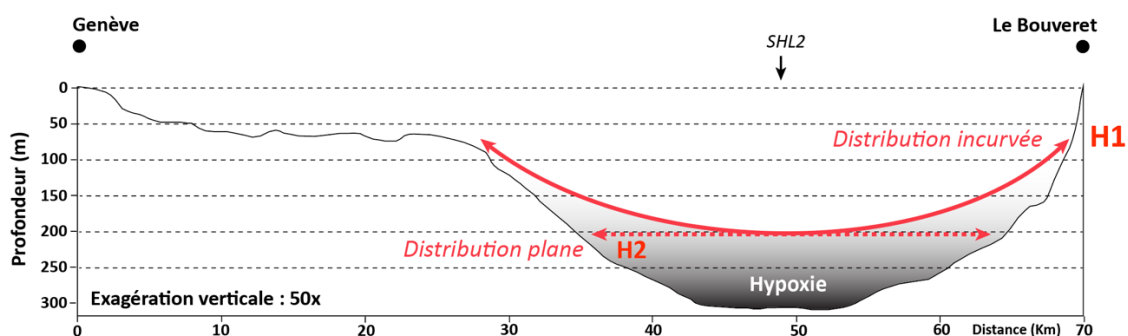


Figure 2 : Coupe transversale du lac Léman et présentation des hypothèses de travail concernant l'extension de l'hypoxie : l'hypothèse est que la distribution spatiale de l'hypoxie (zone grise, avec bordure supérieures correspondant au seuil de 4 mg/L en ligne rouge) présente une forme incurvée (H1), plutôt que plane (H2), en anticipant une consommation d'oxygène plus importante à proximité des sédiments. Cette hypothèse suppose que l'extension totale serait plus importante en surface et volume que ne le laisserait supposer les mesures seules au point SHL2.

Figure 2: Cross-section of Lake Geneva and presentation of working hypotheses concerning the extent of hypoxia: the hypothesis is that the spatial distribution of hypoxia (gray area, with upper edges corresponding to the 4 mg/L threshold shown as a red line) is curved (H1) rather than flat (H2), anticipating greater oxygen consumption near the sediments. This hypothesis assumes that the total extent would be greater in surface area and volume than the measurements at point SHL2 alone would suggest.

## 2. MÉTHODOLOGIE ET ÉCHANTILLONNAGE

La carte ci-dessous (Figure 3) présente les deux transects N-S et E-O où ont été réalisés huit profils de mesure dans la colonne d'eau, le 12 octobre 2022, ainsi que le transect N-S du 25/10/2024 aligné sur le tracé du profil N-S de 2022. Les sites ont été choisis en se basant sur la profondeur du seuil de 4 mg/L repéré au point SHL2 la campagne de suivi limnologique précédant la mission. Pour cela, plusieurs sondes présentées dans le Tableau 1 ont été utilisées.

Les positions des stations de mesures d'O<sub>2</sub> dans la colonne d'eau ont été définies en tenant compte des positions déjà réalisées de la mission de 1997 (Blanc, 1998).

Tableau 1 : Sondes utilisées et caractéristiques.

Table 1 : Probes used and characteristics.

Sondes	Capteurs	Profondeur limite	Remarques
<b>EXO2 YSI-Xylem</b>	CTD O <sub>2</sub> (optode) pH Redox (ORP, Oxidation-Reduction Potential) Chl. Phycocyanine Turbidité fDOM (matière organique dissoute fluorescente)	0 – 250 m	
<b>APHOX-LX Pyroscience</b>	O <sub>2</sub> OXCAPG-UHS-SUB (Ultra-High Speed optode t90 < 0.3 s) + T	0 – 4000 m	La profondeur est en fait prise sur la sonde Level Troll
<b>AQUAlogger 210 TYPT Aquatec</b>	Turbidité (capteur SeaPoint) + T + pression	0 – 250 m	
<b>Level Troll 400 In-Situ</b>	prof. + T	0 – 400 m	
<b>Profondimètre Uwaterc</b>	Prof. profondeur	NA	
<b>Sonde FDO WTW 3630</b>	Valeur de surface O <sub>2</sub> - optode - et T	NA	

## 3. VITESSE D'ACQUISITION DES PROFILS, ÉTALONNAGE ET CONTRÔLES DES MESURES

Les sondes à oxygène dissous ont été étalonnées juste avant les mesures au 100 % de saturation dans l'air humide (RH = 100 %), en tenant compte de la pression atmosphérique.

Les vitesses de descente et de remontée mesurées en 2024 sont présentées sur la Figure 4, pour les neuf stations où les profils ont été réalisés. En 2022 les profils ont été réalisés au treuil électrique (Paillardet), avec une vitesse de descente allant de 32 à 40 cm/s pour la première partie (0 à 190 m), abaissée à env. 10 cm/s pour la dernière partie (200 m – fond). La vitesse de remontée des sondes était de l'ordre de 10-12 cm/s jusqu'à 190 m, puis de 45 à 60 cm/s jusqu'à la surface (ou remontée à vitesse unique de 45 à 60 cm/s pour les stations 6 à 8).

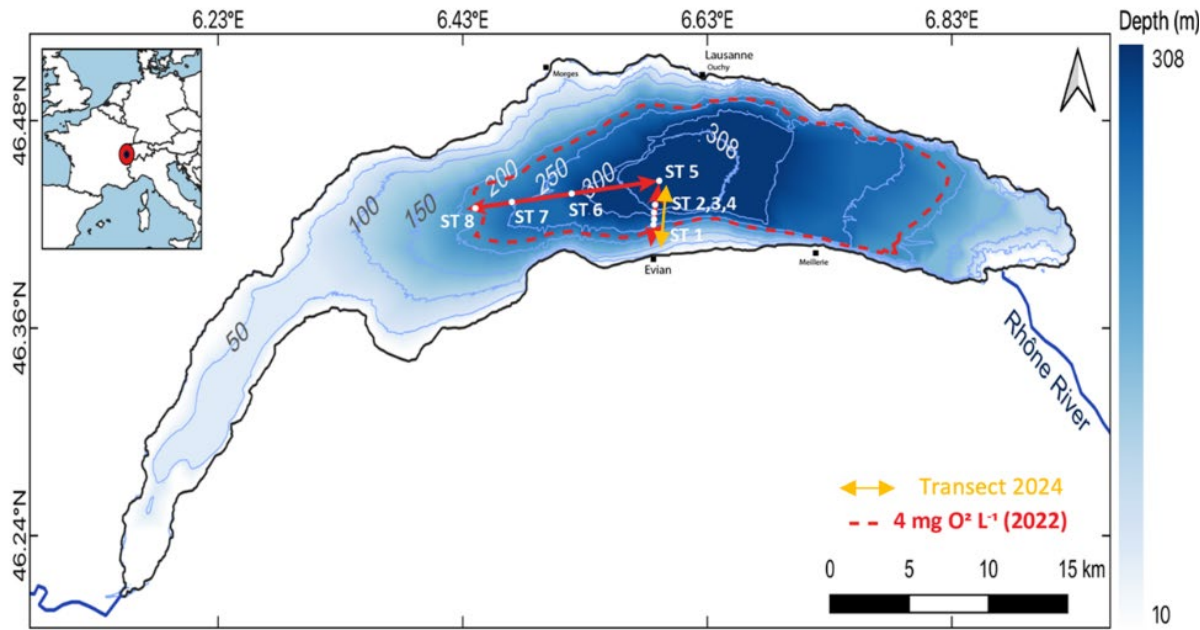


Figure 3 : Carte de localisation des transects nord-sud (NS) et est-ouest (EO) le long desquels ont été conduit les profils de sondes multi-paramètres. Les mesures ont été réalisées avec trois sondes multi-paramètres (APHOX-LX Pyroscience, EXO2 YSI-Xylem et AQUAlogger 210 TYPT Aquatec) descendues dans la colonne d'eau jusqu'au contact avec les sédiments aux huit stations de mesures ST 1-8. Le point ST5 correspond au point SHL2. La zone d'extension du seuil à 4 mg/L, extrapolée à partir des 8 profils en se basant sur l'équation présentée dans la partie résultats, est indiquée en pointillés rouges. À noter que cette estimation est biaisée par le manque de stations de mesures en zone peu profonde (< 210 m) et sous-estime par conséquent probablement l'extension totale en 2022 du seuil à 4 mg/L. Le transect N-S de la campagne de 2024, calqué sur celui de 2022, est indiqué en annexe.

Figure 3 : Map showing the location of the north-south (NS) and east-west (EW) transects along which the multi-parameter probe profiles were conducted. The measurements were taken using three multi-parameter probes (APHOX-LX Pyroscience, EXO2 YSI-Xylem, and AQUAlogger 210 TYPT Aquatec) lowered into the water column until they came into contact with the sediments at the eight measuring stations ST 1-8. Point ST5 corresponds to point SHL2. The extension zone of the 4 mg/L threshold, extrapolated from the eight profiles based on the equation presented in the results section, is indicated by red dotted lines. It should be noted that this estimate is biased by the lack of measuring stations in shallow areas (< 210 m) and therefore probably underestimates the total extension of the 4 mg/L threshold in 2022. The N-S transect for the 2024 campaign, modeled on that of 2022, is shown in the appendix.

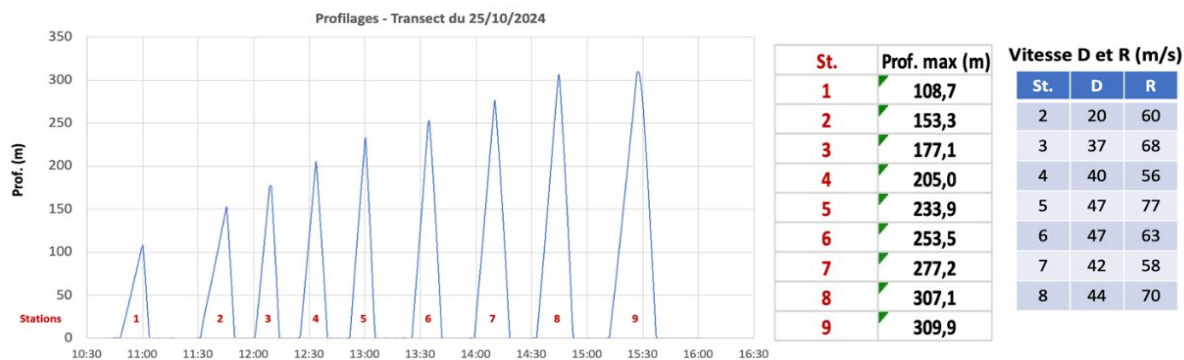


Figure 4 : Caractéristiques de profilage des profils de mesure (SHL2) en 2024 : Vitesses de descente (D) et remontée (R), profondeur maximale de la tranche d'eau au point de mesure.

Figure 4: Profiling characteristics of measurement profiles (SHL2) in 2024: Descent (D) and ascent (R) speeds, maximum depth of the water column at the measurement point.

#### 4. EXTENSION DE LA ZONE HYPOXIQUE

L'extension de la zone hypoxique a été déterminée à partir des profils de la sonde APHOX-LX qui présente une faible hystérésis, c'est-à-dire avec des profils de données relativement identiques à la descente et à la remontée (Figure 5, Figure S1). Ces très bons recouvrements entre les deux sens de profilage sont obtenus grâce au temps de réponse très rapide du capteur d'O<sub>2</sub> APHOX Ultra-High Speed (UHS) ( $t_{90} < 0.3$  s) (Granville et al., 2023). Les optodes classiques comme celle équipant la sonde EXO2 ne permettent pas d'obtenir de tels résultats en raison d'un temps de réponse beaucoup plus lent ( $t_{90} \approx 30$  s d'après le fabricant).

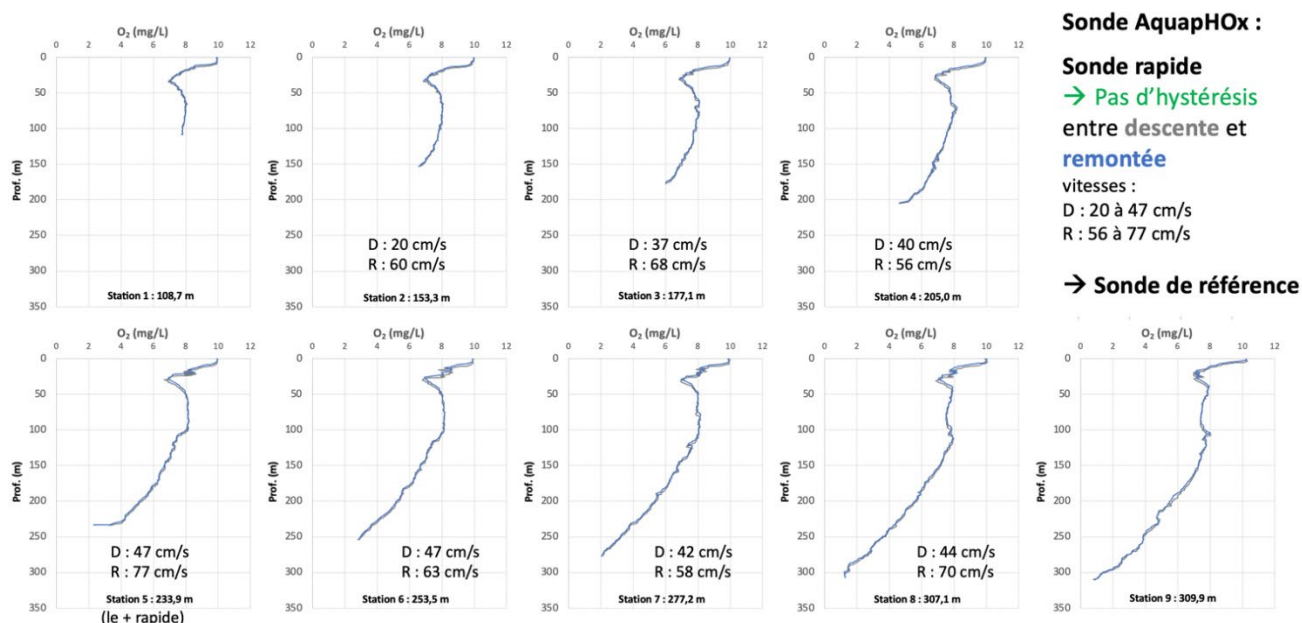


Figure 5 : Profils d'oxygène dissous (mg/L) en 2024 à la descente D et à la remontée (R) – Sonde APHOX-LX, très faible hystérésis observée entre la descente et la remontée.

Figure 5 : Dissolved oxygen profiles (mg/L) in 2024 at descent D and ascent (R) – APHOX-LX probe, very low hysteresis observed between descent and ascent.

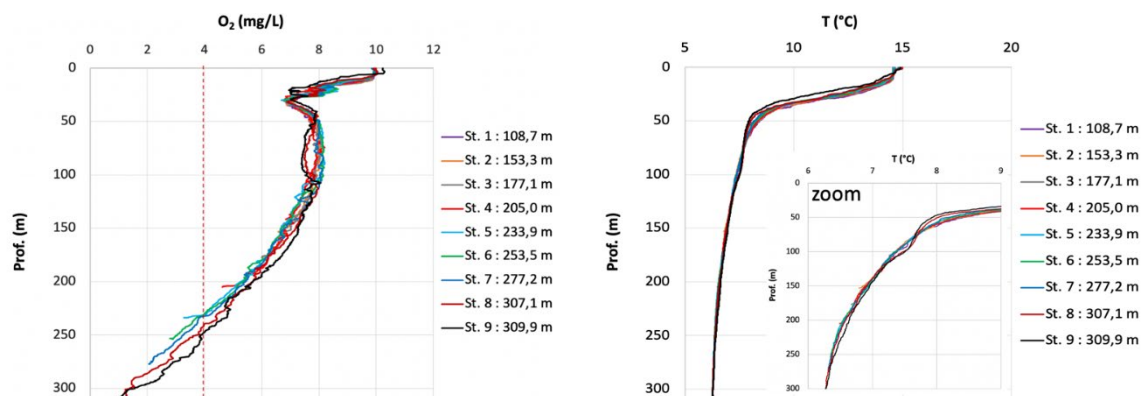


Figure 6 : Profils 2024 T(°C) et O<sub>2</sub> (mg/L) à la descente – Sonde APHOX-LX. Le seuil de 4 mg/L est indiqué, mettant en évidence une hétérogénéité spatiale marquée, avec une variation d'une vingtaine de mètres de la profondeur à laquelle ce seuil est atteint selon les profils.

Figure 6 : 2024 T(°C) and O<sub>2</sub> (mg/L) profiles at the descent – APHOX-LX probe. The threshold of 4 mg/L is indicated, highlighting marked spatial heterogeneity, with a variation of around 20 meters in the depth at which this threshold is reached depending on the profiles.

Les profils présentent une diminution des concentrations d'oxygène vers le fond (Figure 6, Figure S2). Les pentes sont similaires entre les profils laissant suggérer des vitesses de consommation de l'oxygène de même ordre de grandeur dans la zone d'étude. Cette distribution verticale résulte d'une consommation accrue d'oxygène dans les couches profondes, où la respiration aérobie l'emporte largement sur la production primaire, fortement réduite en raison de la diminution de la lumière avec la profondeur.



À cela s'ajoutent les processus de sédimentation et de minéralisation du phytoplancton mort, ainsi que le relargage de composés réduits depuis les sédiments (demande benthique en oxygène). Ces processus stimulent l'activité respiratoire des micro-organismes et favorisent l'oxydation chimique de composés tels que le fer ferreux, le manganèse, l'ammonium ou le méthane, contribuant ainsi à l'appauvrissement en oxygène de l'hypolimnion du Léman (Steinsberger et al., 2020).

La limite de 4 mg/L est atteinte sur chaque profil sauf les trois profils les moins profonds (1,2,3 < 200 m) (cf. ligne verticale de pointillés rouge, Figure 6) mais à des profondeurs différentes selon les profils.

La comparaison des profils entre 2022 et 2024 aux positions proches indique que ces profils sont très similaires (Figure 7).

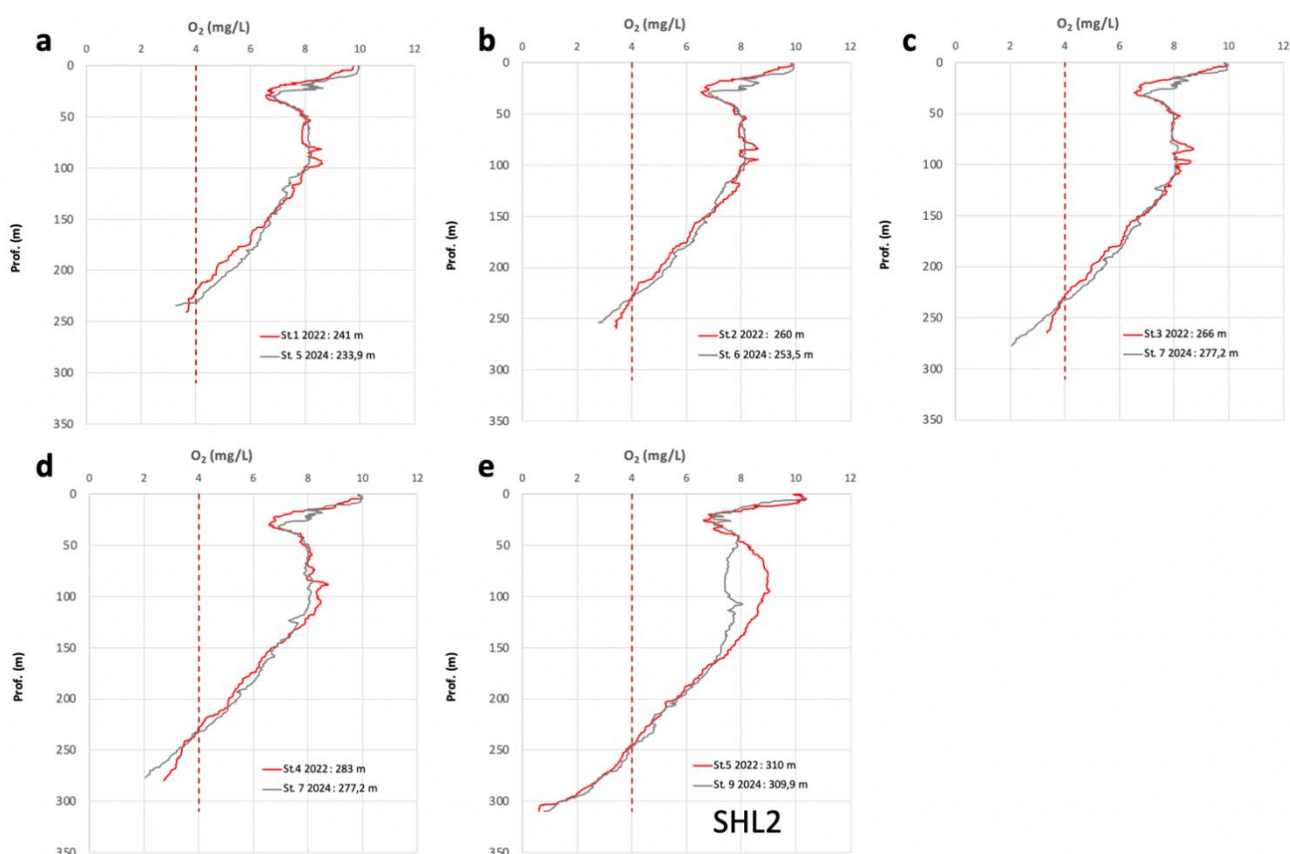


Figure 7 : Comparaison des profils entre 2022 et 2024. Les profils sont très similaires entre les deux années, sauf à la station SHL2 qui présente en octobre 2024 un déficit d'O<sub>2</sub> entre 50 et 150 m par rapport à octobre 2022.

Figure 7 : Comparison of profiles between 2022 and 2024. The profiles are very similar between the two years, except at station SHL2, which shows an O<sub>2</sub> deficit between 50 and 150 m in October 2024 compared to October 2022.

La relation entre la profondeur du lac (*i.e.* bathymétrie) et la profondeur du seuil d'oxygène à 4 mg/L est reportée sur la Figure 8 (campagnes 2022 et 2024). La relation semble linéaire et positive pour l'année 2022, suggérant un approfondissement de la limite d'hypoxie vers le centre du lac. Cette observation implique que la mesure de l'oxygène au point central ne peut pas directement être extrapolée au reste du lac selon un principe d'homogénéité horizontale des masses d'eau, mais laisse plutôt suggérer qu'une extrapolation est possible en suivant une relation linéaire de type :

$$\text{Prof}_{\text{O}_2\text{seuil}} = 0.3313 \times \text{Prof}_{\text{max}} + 141.19$$

Avec :

$\text{Prof}_{\text{O}_2\text{seuil}}$  : Profondeur du seuil d'oxygène à 4 mg/L

$\text{Prof}_{\text{max}}$  : Profondeur maximale du lac au point de mesure



Les données de la campagne de 2024 indiquent quant à elle moins de linéarité dans la réponse et une pente différente. Ceci suggère qu'il n'y a pas de relation universelle, mais plutôt que chaque année est particulière et nécessiterait une campagne d'observation spatiale en automne pour estimer l'étendue de l'hypoxie du fond du lac. Reste en suspens la question, encore non vérifiée, de la variabilité de l'étendue de l'hypoxie au cours d'une même saison, voire d'un même mois, durant l'automne.

Les mesures spatialisées montrent que le protocole basé uniquement sur le point central conduit à une sous-estimation du volume et de la surface hypoxiques (Tableau S5). En se basant sur l'année présentant le plus de contraste (2022), la différence maximale de profondeur du seuil 4 mg/L entre stations atteint 33 m, ce qui correspond à une erreur d'estimation de  $\approx 10.7\%$  de la profondeur totale du lac. Cette variabilité se traduit par une surface sous-estimée de 50 275 000 m<sup>2</sup>, soit  $\approx 8.7\%$  de la surface totale, et un volume hypoxique sous-estimé d'environ  $6.05 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, soit  $\approx 6.8\%$  du volume total du lac ( $\approx 89$  km<sup>3</sup>). Ainsi, bien que le point central fournisse une indication générale, il ne permet pas de capturer l'étendue réelle de l'hypoxie profonde, tant en surface qu'en volume.

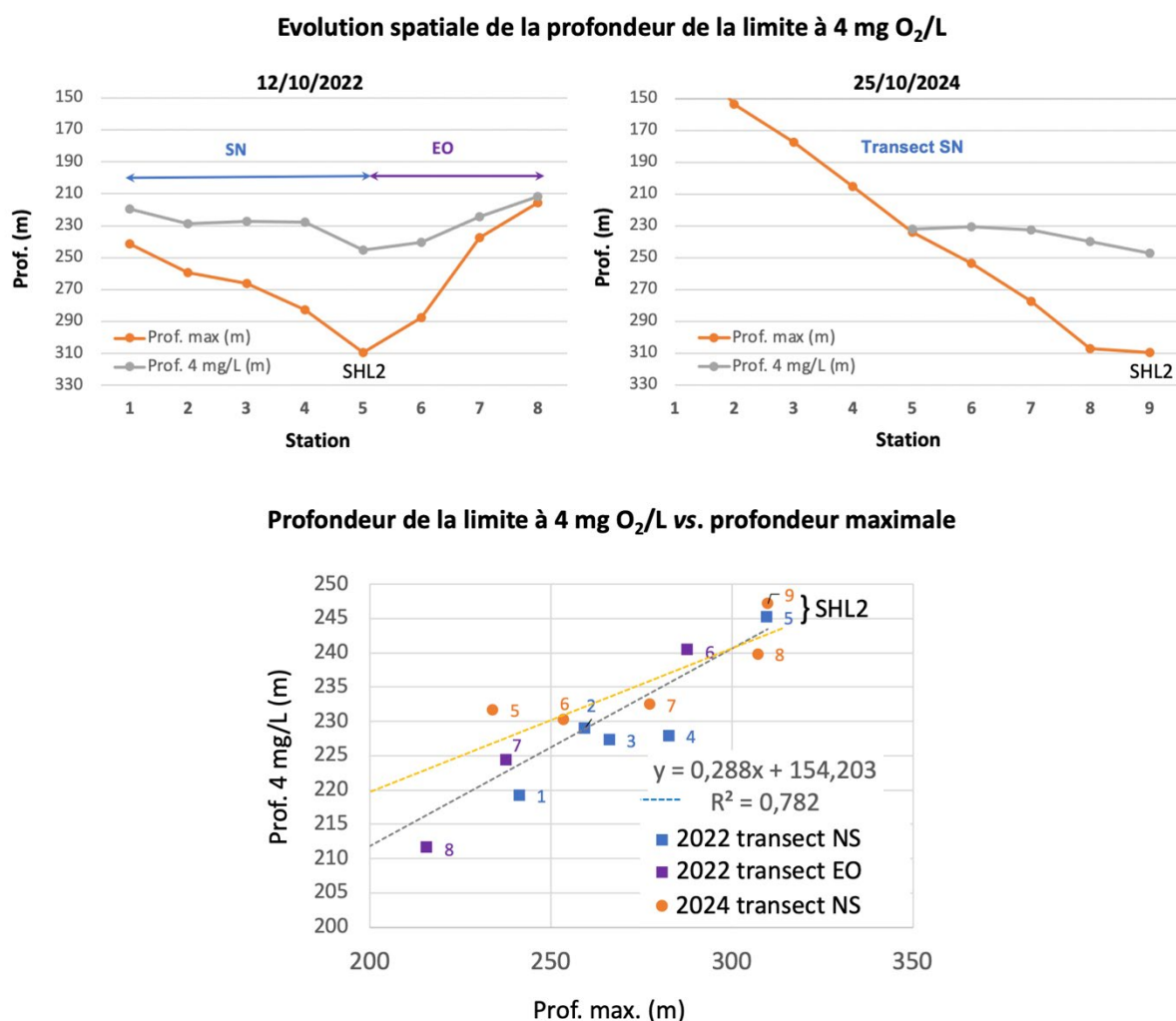


Figure 8 : Relation entre la profondeur bathymétrique et la profondeur observée du seuil à 4 mg/L. Campagne de 2022 (à droite) et de 2024 (à gauche).

Figure 8 : Relationship between bathymetric depth and observed depth of the threshold at 4 mg/L. 2022 campaign (right) and 2024 campaign (left).

## 5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'étude physico-chimique de la colonne d'eau a permis d'étudier une zone particulière au fond du lac, proche de l'interface eau-sédiment, qui n'est habituellement pas investiguée lors des campagnes du suivi CIPEL au point SHL2 depuis 1957.

Les résultats confirment l'hypothèse d'une distribution incurvée – et donc non plane – de la zone hypoxique au fond du lac (H1). En effet, le seuil des 4 mg/L d'oxygène dissous n'est pas atteint à une profondeur uniforme : il tend à se situer à des profondeurs moindres à mesure que l'on s'éloigne du centre du lac. Cette configuration suggère que l'étendue spatiale – et donc le volume – de la masse d'eau hypoxique est plus importante que ce qu'indiquaient les mesures limitées au point central.

Une sonde à O<sub>2</sub> dissous plus performante, résistante aux fortes pressions et présentant un temps de réponse très court, a permis de descendre jusqu'à l'interface eau-sédiments et à conduire des profils multiples dans la même journée sans causer d'hystérésis dans les données. Les résultats indiquent que les valeurs d'oxygène les plus faibles sont enregistrées dans la zone proche de l'interface eau-sédiments, dans les 5 derniers mètres au-dessus des sédiments. Par conséquent il est impératif d'accéder à cette zone pour déterminer l'évolution interannuelle des concentrations minimum d'oxygène au fond du lac et pour repérer les dates et les profondeurs exactes de dépassement des seuils réglementaires de concentration dans les zones moins profondes où le dépassement du seuil est proche de l'interface eau-sédiments.

Le protocole de suivi limnologique actuel au point SHL2 (qui ne fait pas descendre les sondes jusqu'à l'interface eau-sédiments) ne permet pas de suivre correctement l'évolution des conditions physico-chimiques (incluant l'O<sub>2</sub>) des couches profondes d'eau proches de l'interface eau-sédiments. Cette limite a des conséquences sur la capacité de la CIPEL à étudier l'évolution à long-terme de la charge interne en espèces dissoutes dont le phosphore, très dépendante des conditions d'oxygénation au fond.

### L'étude préconise d'améliorer le protocole actuel de suivi :

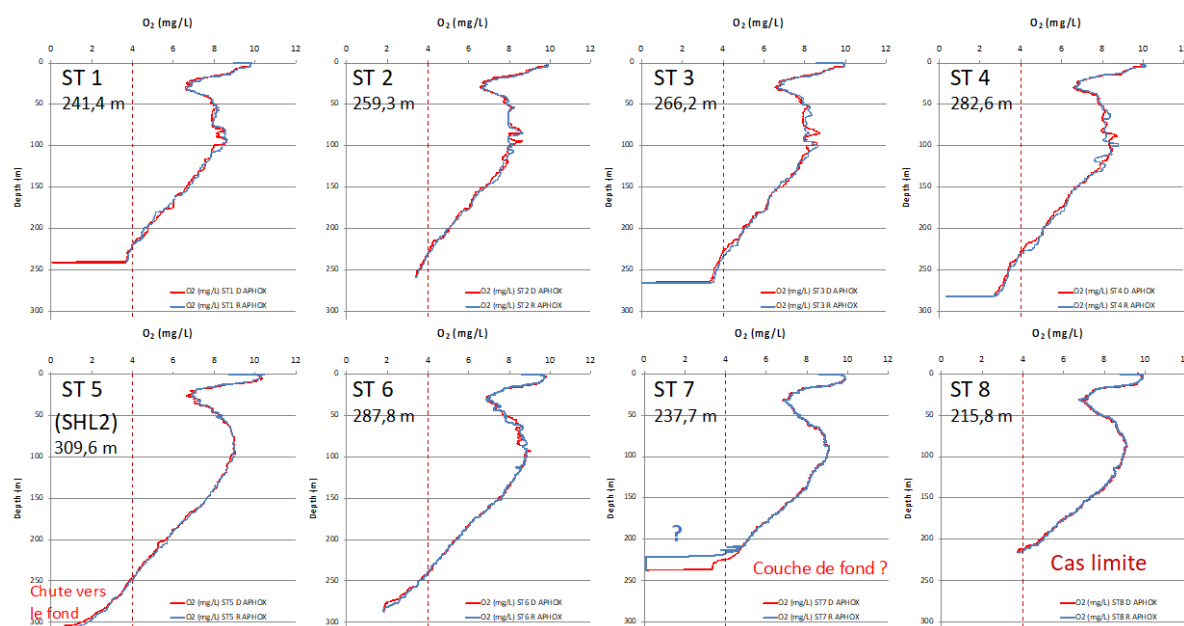
- **Révision de l'indicateur des conditions d'oxygène** : En mettant en œuvre une campagne d'observation annuelle, conduite à l'automne, basée sur un ensemble de profils verticaux répartis le long d'un transect, afin de suivre efficacement la dynamique spatio-temporelle de l'hypoxie dans le Léman : il s'agirait de réaliser 6 profils depuis le point profond SHL2 jusqu'à une profondeur minimale, elle-même déterminée sur le terrain selon les conditions d'oxygène du fond de l'année en cours, de manière à atteindre et pouvoir cartographier l'extension spatiale maximale du seuil de 4 mg/L. Ces mesures permettraient de caractériser la variabilité interannuelle de l'extension maximale de l'hypoxie que l'on ignore avec le suivi actuel.
- **En s'équipant d'une sonde performante et rapide** : qui permette de réduire l'hystérésis entre mesures à la descente et à la remontée (on pourrait réduire autrement l'hystérésis en réalisant lentement les profils avec une sonde classique, mais cela prendrait beaucoup plus de temps). Réduire l'hystérésis est un gage de qualité des données dans le cas du suivi du Léman lors duquel le temps sur le terrain est compté. Dans ce cadre, l'INRAE est en cours d'acquisition d'une nouvelle sonde APHOX-LX (cf. projet OSUG DesoxyLac, financements obtenus).
- **Améliorer le protocole du suivi afin de conduire les mesures jusqu'à l'interface eau-sédiment** : En révisant le dispositif de la cage protectrice afin de mieux protéger les sondes tout en permettant un contact avec l'interface sédimentaire, de manière à atteindre cette interface systématiquement lors des suivis (ce nouveau protocole restant à définir).
- **Encourager une étude pour caractériser la variabilité journalière/hebdomadaire de l'extension maximale de l'hypoxie lors de l'automne d'une même année** : ceci afin d'améliorer la compréhension générale de la dynamique de l'oxygène du fond du lac, mais aussi afin d'améliorer le protocole pour un suivi et des comparaisons interannuelles (e.g. identifier le moment pertinent pour mesurer annuellement l'extension spatiale maximale de l'hypoxie). Cette étude pourrait soit conduire des campagnes répétées lors d'un automne (e.g. ~3-6 fois entre octobre et décembre), et/ou équiper le fond de sondes à O<sub>2</sub> à 3-6 profondeurs clefs entre 150 et 250 m.

## BIBLIOGRAPHIE

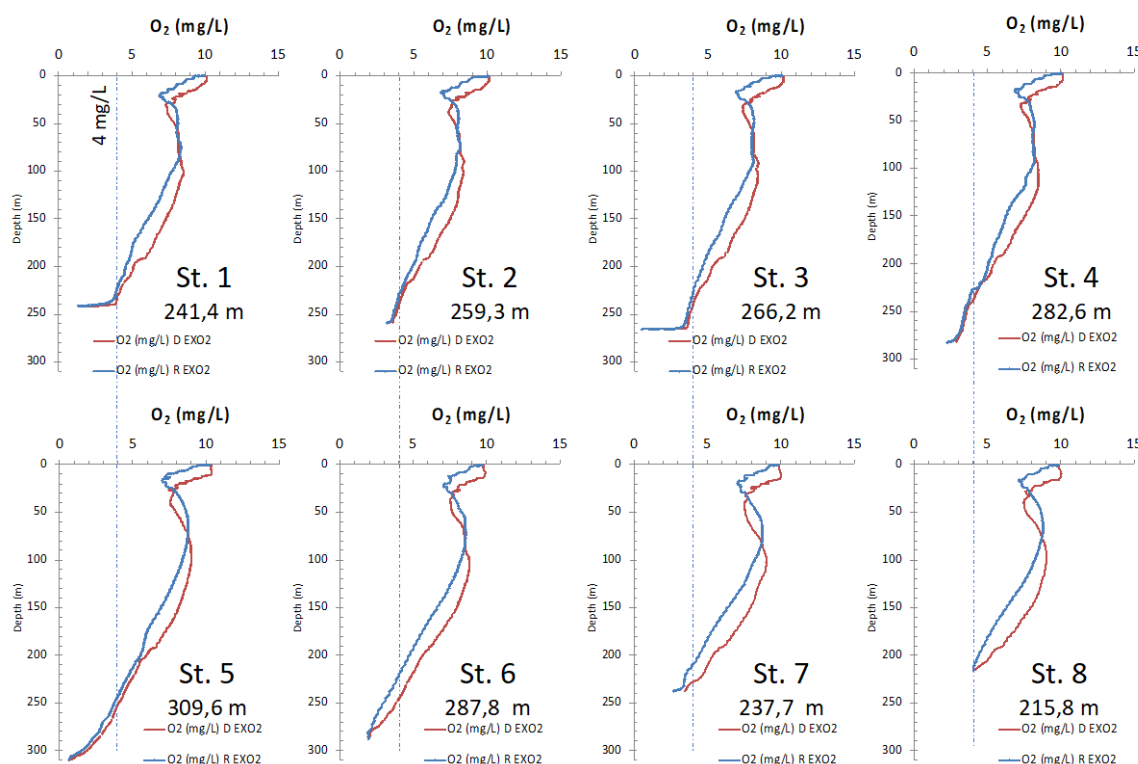
- Blanc, P., 1998. Evaluation de l'étendue de la zone désoxygénée dans la Plaine centrale du Grand lac, en automne 1997. Rapp. Comm. Int. Prot. Eaux Léman contre pollut. Campagne 1997, 61-66.
- Desgué-Itier, O., Melo Vieira Soares, L., Anneville, O., Bouffard, D., Chanudet, V., Danis, P.A., Domaizon, I., Guillard, J., Mazure, T., Sharaf, N., Soullignac, F., Tran-Khac, V., Vinçon-Leite, B., Jenny, J.-P., 2023. Past and future climate change effects on the thermal regime and oxygen solubility of four peri-alpine lakes. *Hydrology and Earth System Sciences* 27, 837–859. <https://doi.org/10.5194/hess-27-837-2023>
- Deutsch, C., Brix, H., Ito, T., Frenzel, H., Thompson, L., 2011. Climate-Forced Variability of Ocean Hypoxia. *Science* 333, 336–339. <https://doi.org/10.1126/science.1202422>
- Deyle, E.R., Bouffard, D., Frossard, V., Schwefel, R., Melack, J., Sugihara, G., 2022. A hybrid empirical and parametric approach for managing ecosystem complexity: Water quality in Lake Geneva under nonstationary futures. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, e2102466119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2102466119>
- Diaz, R.J., Rosenberg, R., 2008. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science* 321, 926–929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
- Jane, S.F., Hansen, G.J.A., Kraemer, B.M., Leavitt, P.R., Mincer, J.L., North, R.L., Pilla, R.M., Stetler, J.T., Williamson, C.E., Woolway, R.I., Arvola, L., Chandra, S., DeGasperi, C.L., Diemer, L., Dunalska, J., Erina, O., Flaim, G., Grossart, H.-P., Hambright, K.D., Hein, C., Hejzlar, J., Janus, L.L., Jenny, J.-P., Jones, J.R., Knoll, L.B., Leoni, B., Mackay, E., Matsuzaki, S.-I.S., McBride, C., Müller-Navarra, D.C., Paterson, A.M., Pierson, D., Rogora, M., Rusak, J.A., Sadro, S., Saulnier-Talbot, E., Schmid, M., Sommaruga, R., Thiery, W., Verburg, P., Weathers, K.C., Weyhenmeyer, G.A., Yokota, K., Rose, K.C., 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature* 594, 66–70. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03550-y>
- Jenny, J.-P., Arnaud, F., Alric, B., Dorioz, J.-M., Sabatier, P., Meybeck, M., Perga, M.-E., 2014. Inherited hypoxia: A new challenge for reoligotrophic lakes under global warming : Holocene hypoxia dynamics in large lakes. *Global Biogeochemical Cycles* 28, 1413–1423. <https://doi.org/10.1002/2014gb004932>
- Jenny, J.-P., Normandeau, A., Francus, P., Taranu, Z.E., Gregory-Eaves, I., Lapointe, F., Jautzy, J., Ojala, A.E.K., Dorioz, J.-M., Schimmelmann, A., Zolitschka, B., 2016. Urban point sources of nutrients were the leading cause for the historical spread of hypoxia across European lakes. *PNAS* 113, 12655–12660. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605480113>
- Müller, B., Bryant, L.D., Matzinger, A., Wüest, A., 2012. Hypolimnetic Oxygen Depletion in Eutrophic Lakes. *Environ. Sci. Technol.* 46, 9964–9971. <https://doi.org/10.1021/es301422r>
- Nixon, S.W., 1995. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia* 41, 199–219.
- O'Reilly, C.M., Sharma, S., Gray, D.K., Hampton, S.E., Read, J.S., Rowley, R.J., Schneider, P., Lenters, J.D., McIntyre, P.B., Kraemer, B.M., Weyhenmeyer, G.A., Straile, D., Dong, B., Adrian, R., Allan, M.G., Anneville, O., Arvola, L., Austin, J., Bailey, J.L., Baron, J.S., Brookes, J.D., Eyto, E. de, Dokulil, M.T., Hamilton, D.P., Havens, K., Hetherington, A.L., Higgins, S.N., Hook, S., Izmet'eva, L.R., Joehnk, K.D., Kangur, K., Kasprzak, P., Kumagai, M., Kuusisto, E., Leshkevich, G., Livingstone, D.M., MacIntyre, S., May, L., Melack, J.M., Mueller-Navarra, D.C., Naumenko, M., Noges, P., Noges, T., North, R.P., Plisnier, P.-D., Rigosi, A., Rimmer, A., Rogora, M., Rudstam, L.G., Rusak, J.A., Salmaso, N., Samal, N.R., Schindler, D.E., Schladow, S.G., Schmid, M., Schmidt, S.R., Silow, E., Soyly, M.E., Teubner, K., Verburg, P., Voutilainen, A., Watkinson, A., Williamson, C.E., Zhang, G., 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters* 42, 10,773–10,781. <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
- Peng, N., Lemmin, U., Mettra, F., Reiss, R.S., Barry, D.A., 2024. Deepwater Renewal in a Large, Deep Lake (Lake Geneva): Identifying and Quantifying Winter Cooling Processes Using Heat Budget Decomposition. *Water Resources Research* 60, e2023WR034936. <https://doi.org/10.1029/2023WR034936>
- Roberts, J.J., Höök, T.O., Ludsins, S.A., Pothoven, S.A., Vanderploeg, H.A., Brandt, S.B., 2009. Effects of hypolimnetic hypoxia on foraging and distributions of Lake Erie yellow perch. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 381, S132–S142.
- Steinsberger, T., Schwefel, R., Wüest, A., Müller, B., 2020. Hypolimnetic oxygen depletion rates in deep lakes: Effects of trophic state and organic matter accumulation. *Limnology and Oceanography* 65, 3128–3138. <https://doi.org/10.1002/lno.11578>
- Straile, D., Jöhnk, K., Rossknecht, H., 2003. Complex Effects of Winter Warming on the Physicochemical Characteristics of a Deep Lake. *Limnology and Oceanography* 48, 1432–1438

## ANNEXES

## ANNEXE 1 – PROFILS CAMPAGNE 2022



→ Faible hystérésis sur la sonde APHOX (qq soit la vitesse de remontée) – Capteur très rapide ( $t_{90} < 0,3$  s)



→ Hystérésis non négligeable sur la sonde EXO2 - Capteur lent ( $t_{63} < 5$  s ;  $t_{90}$  estimé < 12 s)

Figure S1 : Profils d'O<sub>2</sub> dissous (mg/L) en 2022 pour les différentes stations, par la sonde APHOX-LX en haut et par la sonde EXO en bas. Dans le 1<sup>er</sup> cas l'hystérésis est négligeable (capteur Pyroscience très rapide), alors qu'elle est marquée pour la sonde EXO2 (capteur YSI lent).

Figure S1: Dissolved O<sub>2</sub> profiles (mg/L) in 2022 for the different stations, measured by the APHOX-LX probe at the top and the EXO probe at the bottom. In the first case, hysteresis is negligible (very fast Pyroscience sensor), whereas it is significant for the EXO2 probe (slow YSI sensor).

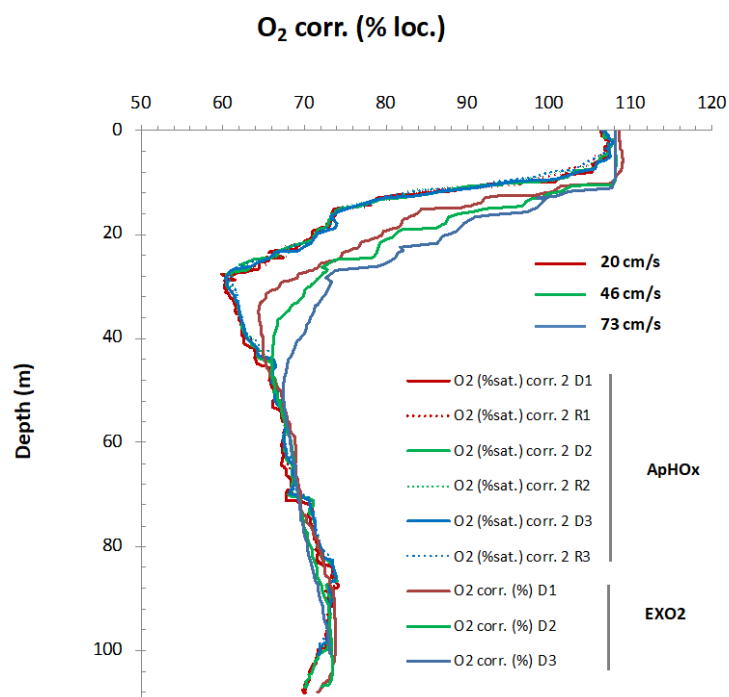
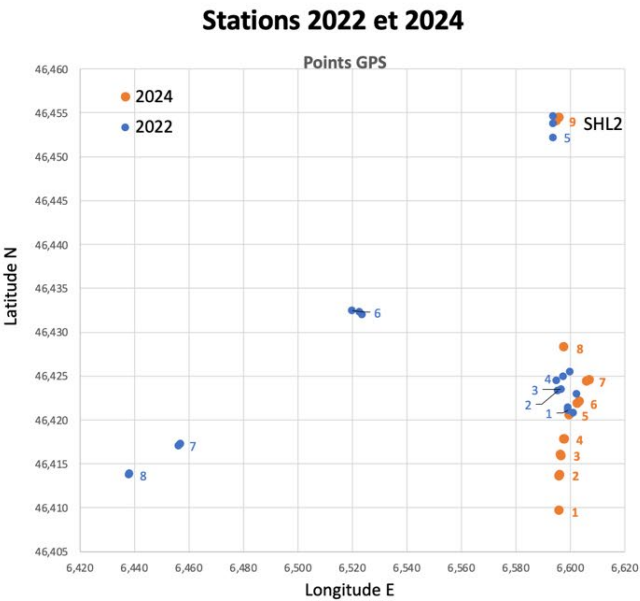
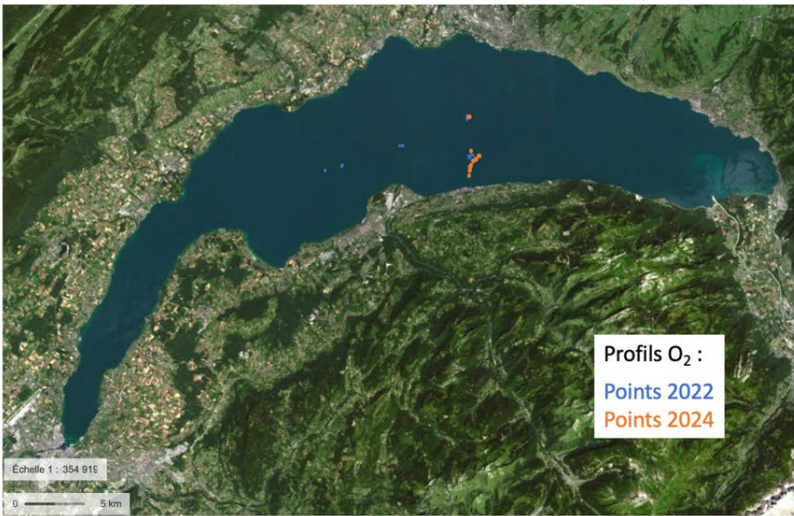


Figure S2 : Profils comparés d'O<sub>2</sub> dissous en 2022 par la sonde APHOX et par la sonde EXO (station LÉXPLORE, 13/10/2022), réalisés au treuil électrique à 3 vitesses différentes (20, 46 et 73 cm/s). Les données de la sonde APHOX sont tout à fait superposables quelle que soit la vitesse de profilage et entre le sens à la descente (D) et à la remontée (R). Les profils obtenus au moyen de la sonde EXO2 (sens descente uniquement représenté) s'écartent de plus en plus des profils APHOX lorsque la vitesse augmente, en raison du temps de réponse trop lent du capteur.

Figure S2: Comparative profiles of dissolved O<sub>2</sub> in 2022 using the APHOX probe and the EXO probe (LÉXPLORE station, 10/13/2022), measured using an electric winch at three different speeds (20, 46, and 73 cm/s). The APHOX probe data are completely superimposable regardless of the profiling speed and between the descent (D) and ascent (R) directions. The profiles obtained using the EXO2 probe (descent direction only shown) deviate increasingly from the APHOX profiles as the speed increases, due to the sensor's slow response time.

ANNEXE 2 – COORDONNÉES DES POSITIONS DE MESURE



Station n°	Heure descente	Heure fond	Heure surface	N	E	Prof. sondeur (m)	Prof. Uwatec (m)	Prof. câble (m)
1	10:49	11:01	11:05	46.40966	6.59585	108	108	
2	11:32	11:46		46.413750 46.413570	6.596090 6.595900	153	153	
3	12:01	12:10	12:15	46.416010 46.415860	6.596510 6.595690	177	177	
4	12:26	12:34	12:40	46.417810 46.417810	6.597580 6.597790	205	205	
5	12:52	13:01	13:06	46.420660 46.420630	6.595930 6.599970	229	234	
6	13:26	13:35		46.421880 46.422100	6.602690 6.603310	252 253	253	249.2
7	13:59	14:10	14:19	46.424400 46.424550	6.605940 6.606390	274	277	254.4
8	14:33	14:53	14:53	46.42829	6.59762	307	308	251
9 SHL2	15:12	15:28	15:38	46.454060 46.454460	6.594970 6.595950	311 311	310	

Figure S3 : Position des stations en 2024.

Figure S3: Station locations in 2024.

Tableau S4 : Position des stations en 2022.

Tableau S4 : Station locations in 2022.

WP n°	Station	Heure	N	E	Prof. (m)
14	1	10:09	46.421115	6.599035	
15	1	10:28	46.420840	6.600927	241.4
16	2	11:19	46.423367	6.595387	259.3
18	3	12:06	46.421415	6.599080	
19	3	12:33	46.423485	6.596437	
20	3	13:28	46.422981	6.602188	266.2
21	4	13:41	46.424532	6.594751	
22	4	14:07	46.424957	6.597331	
23	4	14:29	46.425490	6.599768	282.6
24	5	14:52	46.452217	6.593470	
25	5	15:23	46.453827	6.593538	
26	5	15:47	46.45466	6.593680	309.6
27	6	16:23	46.432490	6.519831	
28	6	16:50	46.432328	6.522454	
29	6	17:03	46.432055	6.523597	287.8
30	7	17:32	46.417106	6.456061	
31	7	17:50	46.417272	6.456646	
32	7	18:00	46.417288	6.456881	237.7
33	8	18:13	46.413784	6.437882	
34	8	18:31	46.413915	6.437982	
35	8	18:37	46.413870	6.438069	215.8

Tableau S5 : Extension de l'hypoxie en 2022 et 2024 – Profondeur bathymétrique, profondeur minimale où le seuil de 4 mg/L est mesuré (i.e. remonté de l'hypoxie), volume et surface correspondante.

Tableau S5 : Extension of hypoxia in 2022 and 2024 – Bathymetric depth, minimum depth where the threshold of 4 mg/L is measured (i.e., rise in hypoxia), volume, and corresponding surface area.

**25 octobre 2024****APHOX**

Station	Prof. max (m)	Prof. 4 mg/L	Volume (km <sup>3</sup> )	Surface (m <sup>2</sup> )
1	108.676			
2	153.276			
3	177.083			
4	204.991			
5	233.936	231.8	8.69	181437500
6	253.496	230.3	9.06	184750000
7	277.191	232.5	8.69	181437500
8	307.072	239.9	7.23	168187500
9	309.864	247.2	5.94	156200000

**12 octobre 2022****APHOX**

Station n°	Prof. max (m)	Prof. 4 mg/L (m)	Volume (km <sup>3</sup> )	Surface (m <sup>2</sup> )
1	241.3	219.3	11.07	201018750
2	259.3	229.0	9.24	186250000
3	266.1	227.4	9.61	189250000
4	282.6	228.0	9.43	187750000
5	309.6	245.3	6.31	159625000
6	287.8	240.4	7.23	168187500
7	237.7	224.3	10.16	193750000
8	215.8	211.6	12.36	209900000