

ÉTENDUE DE LA ZONE ANOXIQUE AU FOND DU LÉMAN

EXTENSION OF THE ANOXIC ZONE AT THE BOTTOM OF LAKE GENEVA

CAMPAGNE 2022

PAR

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

UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC, INRAE, CARRTEL, 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, 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 O₂ L⁻¹. 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 deux transects à l'automne 2022 afin de cartographier l'étendue de l'hypoxie dans l'hypolimnion. Les mesures conduites à partir d'une sonde APHOX-LX indiquent que le seuil de 4 mg O₂ L⁻¹ a été atteint entre les profondeurs 212 et 245 m selon les profils étudiés. 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 important que ne le suggérait jusqu'alors les mesures réalisées au point central du lac. Cette étude met en évidence une limite actuelle dans le protocole de suivi de l'oxygène qui n'est pas adapté à l'étude des conditions à l'interface avec les sédiments. 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.

ABSTRACT

Oxygen conditions is a fundamental variable for aquatic life. However, a succession of mild winters has hindered the complete mixing of the waters in Lake Geneva, thus limiting the mixing of surface waters with deep waters and reducing the annual oxygen recharge in the hypolimnion. Further, low oxygen supply has not compensated for the biological and chemical oxygen demand, leading to the onset of hypoxic conditions during autumn and the spread of oxygen condition below 4 mg O₂ L⁻¹ as recommended by the Swiss regulations. Despite the occurrence of hypoxia observed over the last years at the deepest point of the lake (SHL2 station), information to characterise the spatial extent of hypoxic waters is still very limited. In this study, eight vertical physico-chemical profiles were carried out in the water column following two transects in the fall of 2022 in order to map the extent of hypoxia in the hypolimnion. APHOX-LX probe data indicate that the threshold of 4 mg O₂ L⁻¹ was reached between depths 211.6 and 245.3 m according to the profiles studied (corresponding to the minimum and maximum depths of the stations studied, respectively 215.8 m and 309.6 m). Therefore the distribution of oxygen concentrations is not horizontal, but rather tends to present a curved distribution. Low oxygen conditions in Lake Geneva have larger spatial extent than previously suggested by monthly monitoring in SHL2. This study suggests a current limitation in the oxygen monitoring protocol which is not suitable for studying the conditions in the waters near the sediment interface. This limitation compromises our understanding of the oxygen conditions in the hypolimnion, but also potential effects on benthic habitats or internal phosphorus and trace metal loads.

1. INTRODUCTION

Dans les environnements marins et lacustres, l'hypoxie ($[O_2] < 2 \text{ mg L}^{-1}$ selon Roberts *et al.*, 2009 ou $[O_2] < 4 \text{ mg L}^{-1}$ selon les normes suisses) devrait augmenter en étendue, en intensité et en durée (Diaz and Rosenberg, 2008; Jane *et al.*, 2021) 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 d'oxygène des eaux (Müller *et al.*, 2012; Nixon, 1995). De plus, 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 ou contribue à la diminution de l'efficacité du mélange de l'eau et du renouvellement de l'oxygène (Straile *et al.*, 2003).

Dans le cas du Léman, les suivis mensuels conduits depuis 1957 au point central mettent en évidence des cycles annuels de recharge hivernal en oxygène par brassage mécanique 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). 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^e siècle (Deyle *et al.*, 2022). Au cours des trois dernières décennies, les températures de l'eau ont augmenté de $0,46 \pm 0,02^\circ\text{C}$ par décennie dans l'épilimnion et de $0,33 \pm 0,06^\circ\text{C}$ par décennie dans l'hypolimnion (Desgué-Itier *et al.*, 2023). Conjointement, et en raison du changement thermique, la solubilité de l' O_2 a diminué de $0,104 \text{ mg L}^{-1}$ par décennie ($\pm 0,005 \text{ mg L}^{-1}$) et de $0,096 \text{ mg L}^{-1}$ par décennie ($\pm 0,011 \text{ mg L}^{-1}$) dans l'épilimnion et l'hypolimnion, respectivement (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 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 cette présente étude autour de l'étendue de la zone hypoxique. Une campagne a été effectuée mi-octobre, 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. L'objectif de la campagne dans le grand bassin du Léman est de cartographier l'étendue de la zone hypoxique et d'étudier les modalités de cette étendue. La campagne doit en outre aider à apprécier s'il y a lieu de compléter l'indicateur « oxygène dissous » du suivi limnologique avec une estimation de l'étendue de la zone $< 4 \text{ mg L}^{-1}$ correspondant aux normes de qualité des eaux en Suisse. 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.

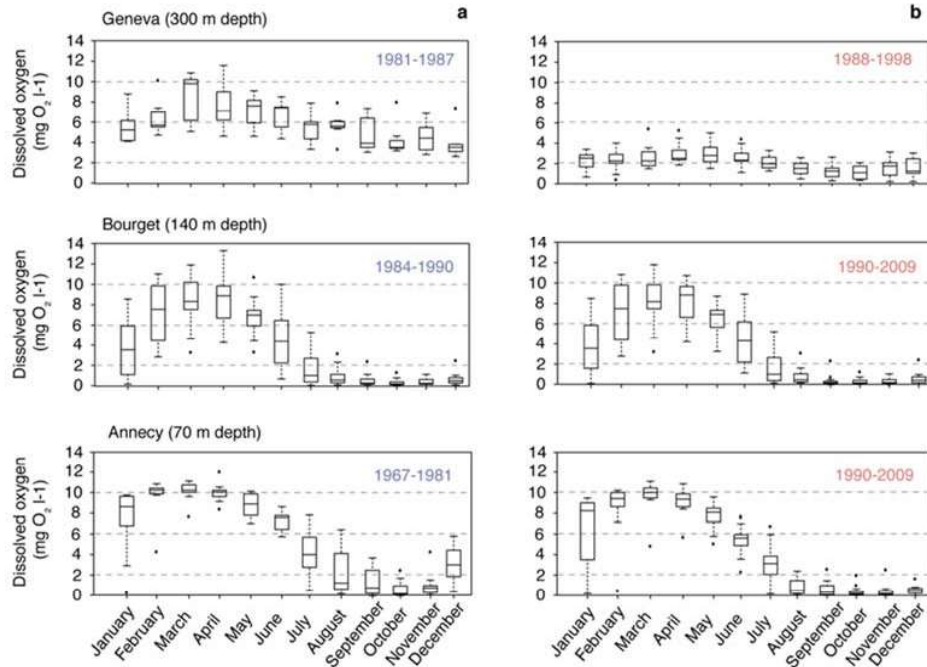


Figure 1: Distribution des concentrations d'oxygène benthique sur 3 lacs périalpins de ~300, 140 et 70 m de profondeur maximale, dont le Léman (panel du haut) pour une période bien oxygénée (a) et moins bien oxygénée (b). Cette distribution permet de mieux préciser la date stratégique de mission. Noter que dans le cas du Léman c'est l'intensité du renouvellement du stock d'oxygène en hiver (i.e. **brassage hivernal**) qui semble conditionner principalement les conditions d'oxygénation sur un cycle annuel, en période moins oxygénée, alors que dans le cas du lac d'Annecy la **durée de stratification** semble être le facteur déterminant sur les conditions d'anoxie à l'échelle d'une année. Le lac du Bourget semble être un cas intermédiaire (Jenny et al., 2013).

Figure 1: Distribution of benthic oxygen concentrations for three perialpine lakes at ~300, 140, and 70 m maximum depth, including Lake Geneva (upper panel) for a well-oxygenated period (a) and a less well-oxygenated period (b). This distribution makes it possible to specify the best mission date. Note that in the case of Lake Geneva, the intensity of oxygen stock renewal in winter (i.e., winter mixing) seems to mainly determine the oxygenation conditions on an annual cycle, during the least oxygenated period, whereas in the case of Annecy Lake the duration of stratification seems to be the determinant factor on the anoxic conditions, on the yearly scale. Bourget Lake seems to be an intermediate case (Jenny et al., 2013).

2. METHODOLOGIE ET ECHANTILLONNAGE

La carte ci-dessous (Fig. 2) 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. Les sites ont été choisis en se basant sur la profondeur du seuil de 4 mg L⁻¹ repéré au point SHL2 la campagne de suivi limnologique précédant la mission. Pour cela, plusieurs sondes présentées dans le tableau 1 ont été utilisées.

Tableau 1 : Sondes utilisées et caractéristiques

Table 1: Probes used and their characteristics

Sondes	Capteurs	Profondeur limite	Remarques
EXO2 YSI-Xylem	CTD O2 (optode) pH Redox (ORP, Oxidation-Reduction Potential) Chl. Phycocyanine Turbidité fDOM (matière organique dissoute fluorescente)	0 – 250 m	
APHOX-LX Pyroscience	O2 OXCAPG-UHS-SUB (Ultra-High Speed optode t90 < 0,3 s) + T	0 – 4000 m	pas de capteur de pression sur cette sonde qui doit être synchronisée sur la CTD EXO2
AQUAlogger 210 TYPT Aquatec	Turbidité (capteur SeaPoint) + T + pression	0 – 250 m	
Level Troll 400 In-Situ	prof. + T	0 – 400 m	
Profondimètre Uwatec	prof	NA	
Sonde FDO WTW 3630	valeur de surface O2 - optode - et T	NA	

Les positions des stations de mesures d'O₂ dans la colonne d'eau ont été définies d'après les certaines positions de la mission de 1997 (Blanc, 1998).

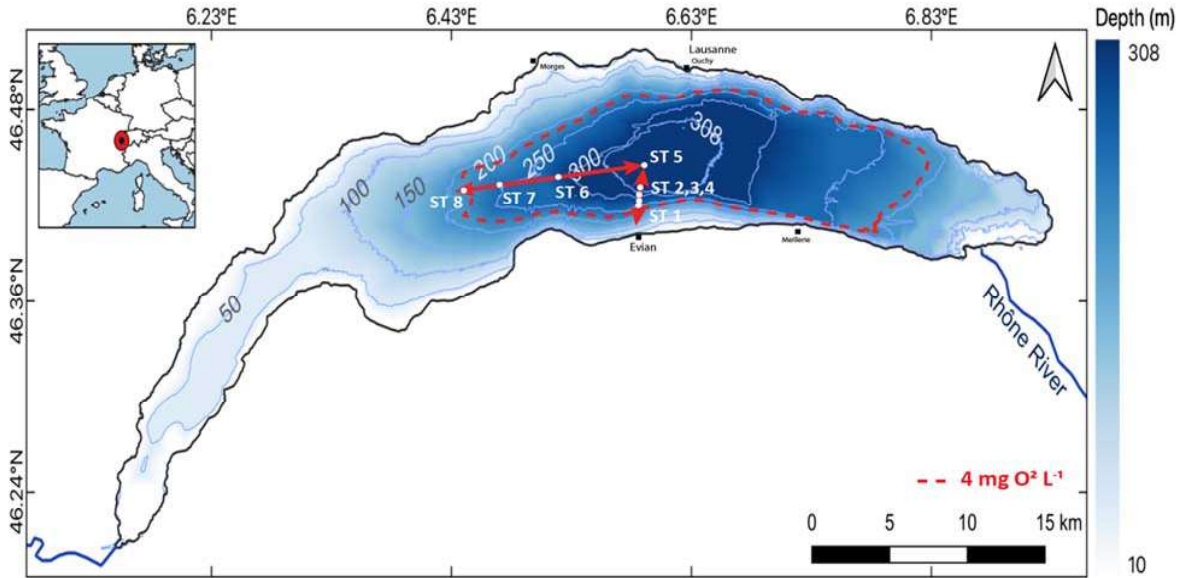


Figure 2 : Carte de localisation des transects nord-sud (NS) et est-ouest (EO) le long desquels ont été conduit les profils de sondes multi-paramètres. Les mesures ont été réalisées avec trois sondes multi-paramètres (APHOX-LX Pyrosience, EXO2 YSI-Xylem et AQUAlogger 210 TYPT Aquatec) descendues dans 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 $4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, extrapolé à partir des 8 profils en se basant sur l'équation présenté dans la partie résultat, est indiquée en pointillés rouge. A 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 du seuil à $4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$.

Figure 2: Map showing the north-south (NS) and east-west (EO) transects along which the multiparameter probe profiles were conducted. The measurements were taken with three multiparameter probes (APHOX-LX Pyrosience, EXO2 YSI-Xylem, and AQUAlogger 210 TYPT Aquatec) lowered in the water column until contact with the sediments at the eight measurement stations ST 1–8. The ST5 point corresponds to the SHL2 point. The extension zone of the threshold at $4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, extrapolated from the eight profiles based on the equation presented in the Results, is indicated by a red dotted line. It should be noted that this estimation is biased by the lack of measurement stations in shallow zones (<210 m) and consequently probably underestimates the total extension of the threshold at $4 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$.

3. VITESSE D'ACQUISITION DES PROFILS, ETALONNAGE ET CONTOLES 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 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 st. 6 à 8). Un exemple est donné figure 3 pour la station 5 (SHL2).

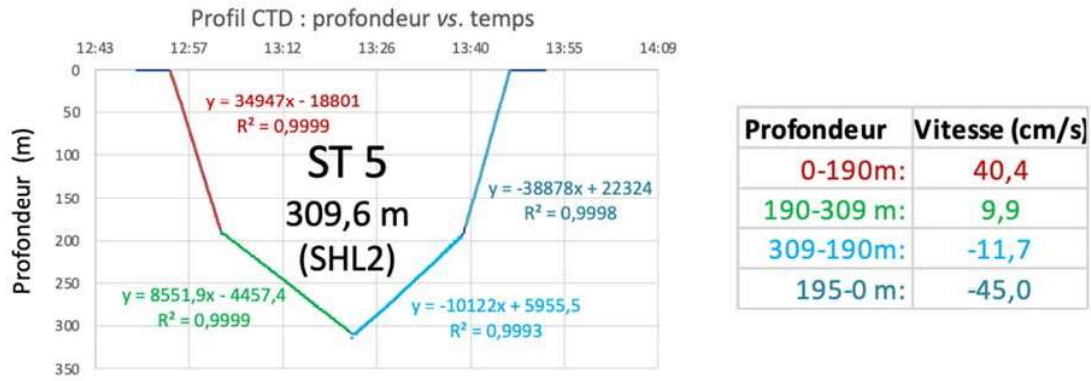


Figure 3 : Caractéristiques de profilage pour la station 5 (SHL2) : Vitesses de descente et remontée.

Figure 3: Profiling characteristics for station 5 (SHL2): descent and ascent speeds

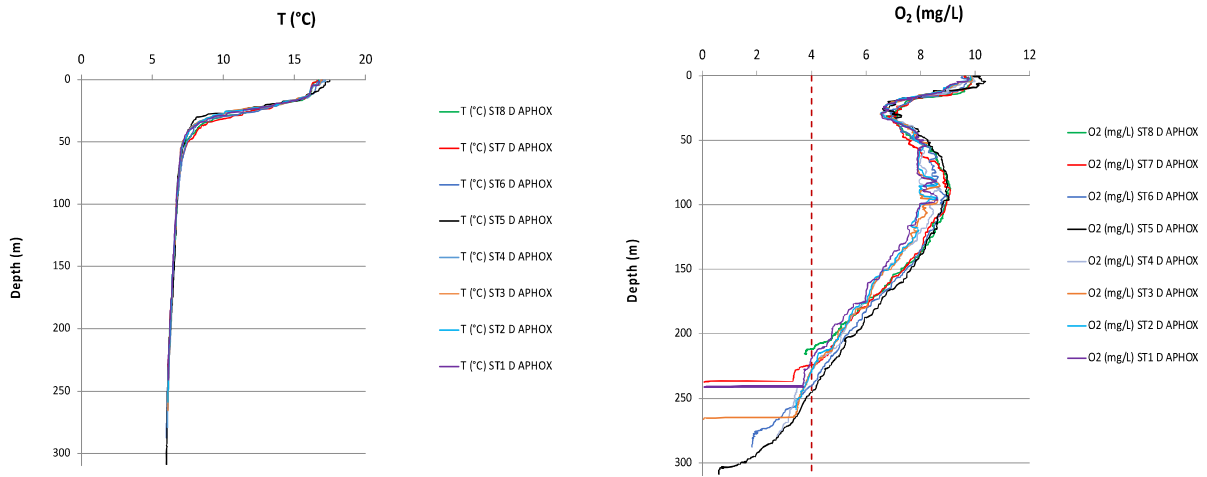


Figure 4 : Profils T et O₂ (mg/L) à la descente – Sonde APHOX-LX

Figure 4: Profiles T and O₂ (mg/L) descending: APHOX-LX probe

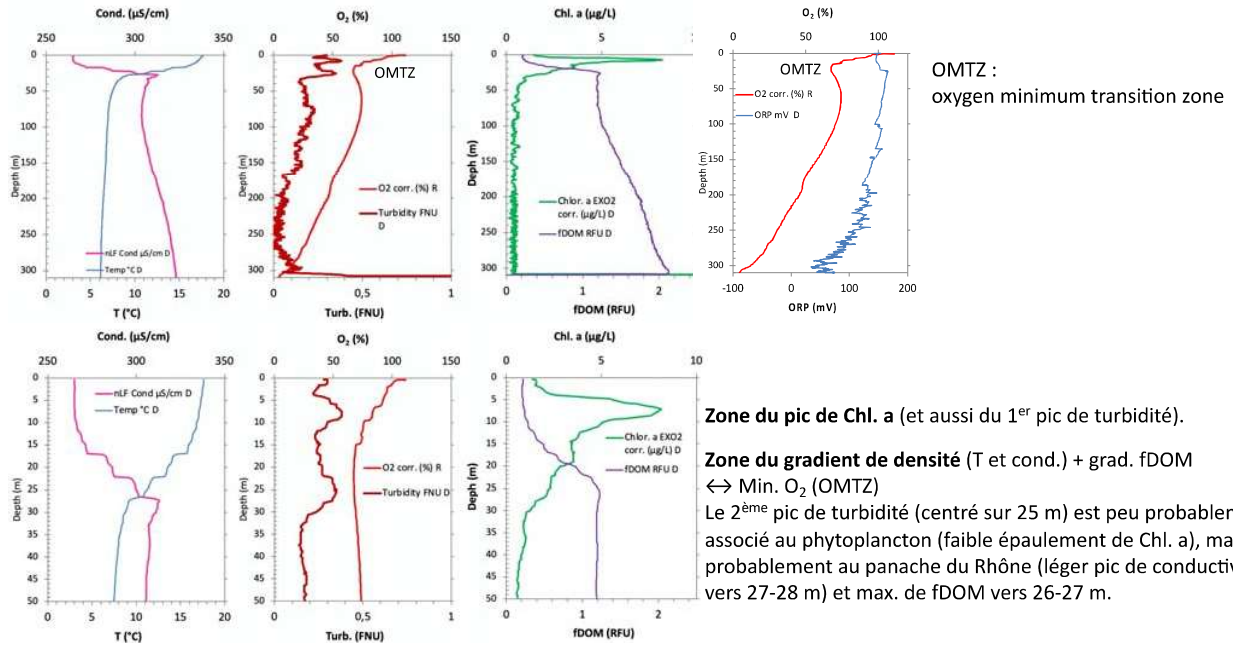


Figure 5 : Profils physico-chimiques mesurés au point central SHL2 en complément des données d'oxygène. Les courbes du haut présente les profils sur toute la tranche d'eau alors que les courbes du bas sont centrées sur les 50 premiers mètres sous la surface.

Figure 5: Physicochemical profiles measured at the SHL2 central point in addition to the oxygen data. The upper curves present the profiles for the entire water column, while the lower curves are centered on the first 50 meters under the surface.

La diminution de la concentration en O₂ est corrélée à la baisse du potentiel rédox et à l'augmentation de la matière organique dissoute (fDOM) (Figure 5).

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 (Fig. 6).

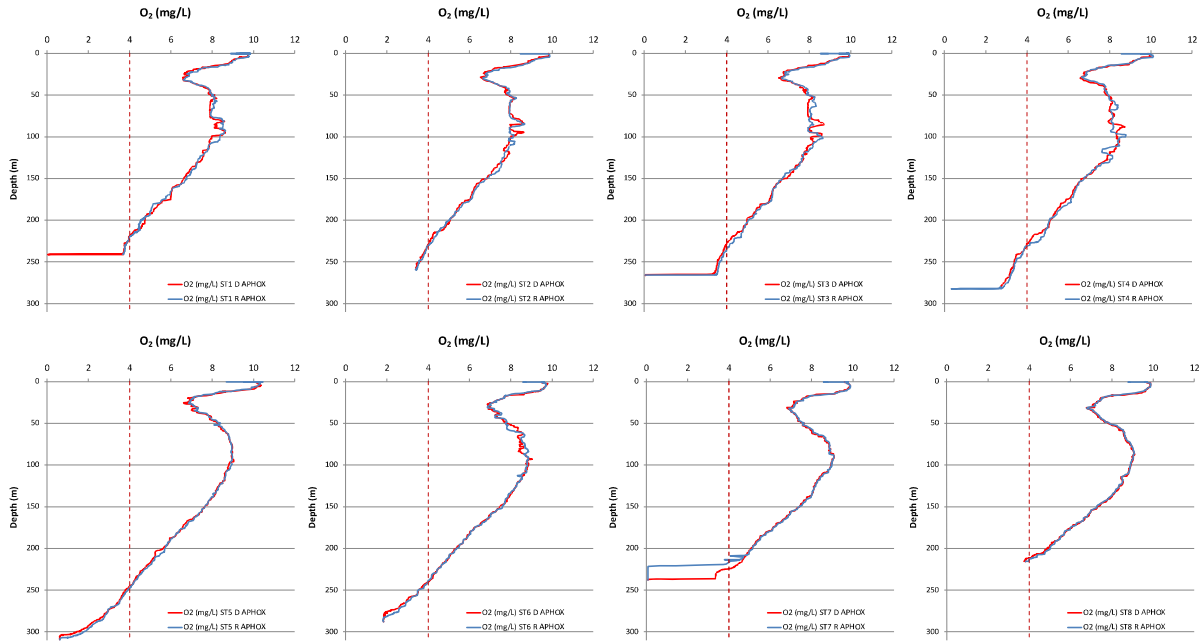


Figure 6 : Profils d'oxygène dissous (mg/L) à la descente D et à la remontée (R) – Sonde APHOX-LX

Figure 6: Dissolved oxygen profiles (mg/L) descent D and ascent (R): APHOX-LX probe

Les profils présentent des tendances à la diminution des concentrations d'oxygène vers le fond. 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 est due à une plus forte consommation de l'oxygène dans les couches profondes, la respiration aérobie dominant sur la production primaire qui devient de plus en plus faible avec l'atténuation de la lumière d'une part, et par réaction de l'O₂ avec la matière organique et les espèces dissoutes réduites au fond du lac en provenance des sédiments (demande benthique en O₂) d'autre part, ce qui favorise la respiration par les micro-organismes et l'oxydation chimique de certains composés (éléments métalliques comme le fer ferreux et le manganèse, ammonium, méthane...).

Les valeurs proches ou égales à zéro observées sur la plupart des profils indiquent que l'interface eau-sédiment a été atteinte par la sonde (confirmé par la turbidité). Cette information permet de vérifier que les profils complets de la colonne d'eau ont été collectés. Les valeurs ainsi obtenues dans les couches les plus profondes pourront ainsi être comparées entre profils. Ce n'est pas le cas des suivis du monitoring mensuel pour lesquels il manque un à plusieurs derniers mètres avant l'interface (variable selon les profils et donc non comparables).

La limite de 4 mg O₂ L⁻¹ est atteinte sur chaque profil (cf. ligne verticale de pointillés rouge, Figure 6) mais à des profondeurs différentes selon les profils.

La relation entre la profondeur du lac (*i.e.* bathymétrie) et la profondeur du seuil d'oxygène à 4 mg O₂ L⁻¹ est reportée sur la figure 7. La relation semble linéaire et positive, 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 $Prof_{O_2\text{seuil}} = 0,3313 \times Prof_{\text{max}} + 141,19$, avec $Prof_{O_2\text{seuil}}$: Profondeur du seuil d'oxygène à 4 mg O₂ L⁻¹ et $Prof_{\text{max}}$: profondeur maximale du lac au point de mesure.

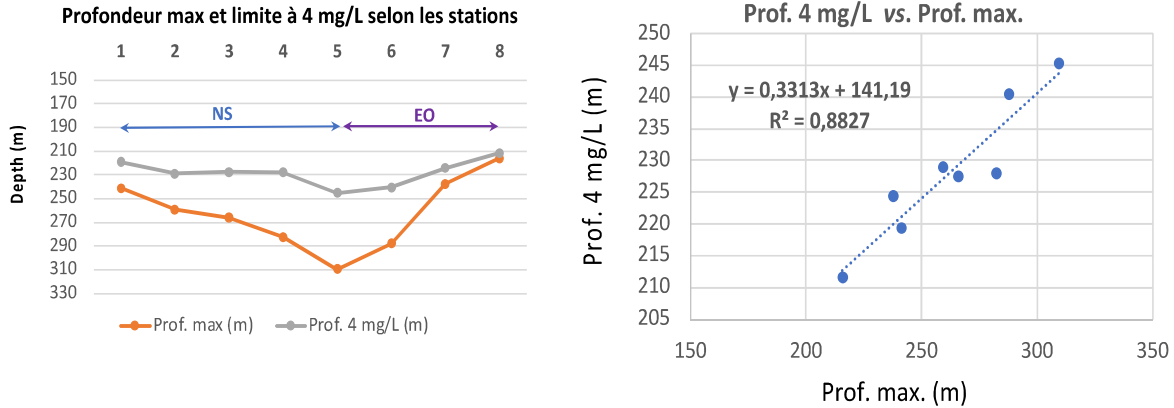


Figure 7 : Relation entre la profondeur bathymétrique et la profondeur observée du seuil à 4 mg O₂ L⁻¹.

Figure 7: Relation between bathymetric depth and the observed threshold depth at 4 mg O₂ L⁻¹.

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.

Une sonde à O₂ 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. Les résultats indiquent que les valeurs d'oxygène les plus faibles sont enregistrées dans cette zone proche de l'interface, 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.

Le protocole de suivi limnologique actuel au point SHL2 (qui ne fait pas descendre les sondes jusqu'à l'interface) ne permet pas de suivre correctement l'évolution des conditions physico-chimiques (incluant l'O₂) 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, notamment en révisant la disposition des sondes dans la cage protectrice de manière à atteindre l'interface lors de tous les suivis (nouveau protocole à mettre au point), et en incluant une nouvelle sonde oxygène performante.

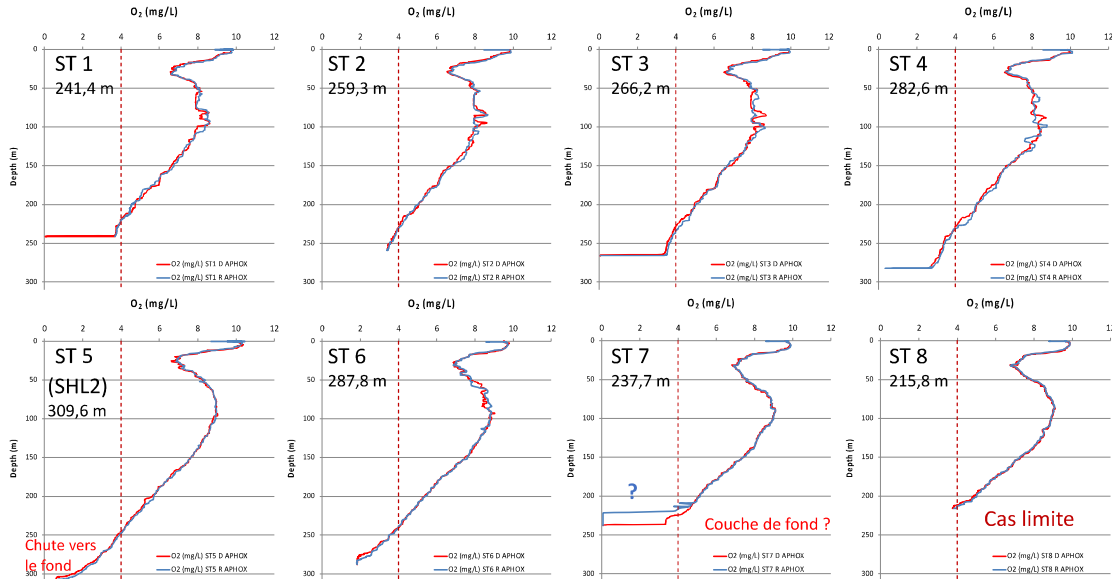
L'étude préconise en outre de conduire une nouvelle mission de cartographie plus précise/complète de l'extension de l'hypoxie, en intégrant désormais des positions plus proches du littoral et moins profondes. Cette nouvelle cartographie devra permettre de conclure si l'indicateur oxygène peut-être amélioré par un calcul d'extension spatiale de l'hypoxie déterminé à partir du seul profil au point central SHL2.

BIBLIOGRAPHIE

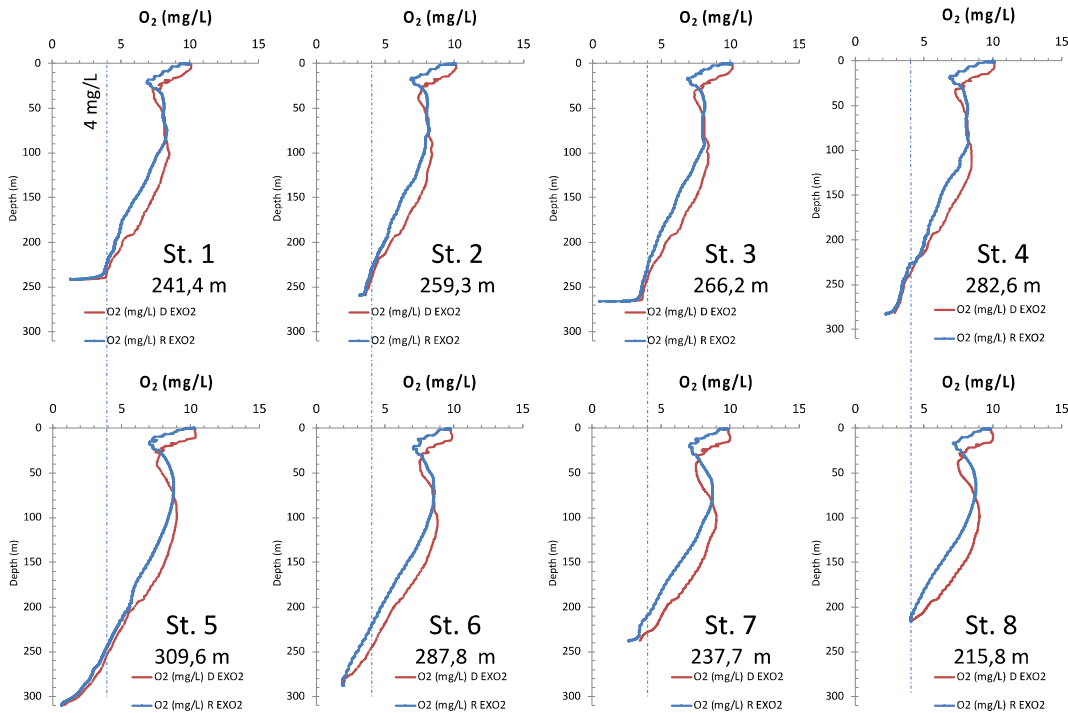
- Blanc, P., 1998. Evaluation de l'étendue de la zone désoxygénée dans la Plaine centrale du Grand lac, en automne 1997. Rapp. Comm. Int. Prot. Eaux Léman contre pollut. Campagne 1997, 61-66.
- Desgué-Itier, O., Melo Vieira Soares, L., Anneville, O., Bouffard, D., Chanudet, V., Danis, P.A., Domaizon, 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., DeGasperis, 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., Izmest'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., Soylu, 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>
- Roberts, J.J., Höök, T.O., Ludsin, 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.
- 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



→ 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'O₂ dissous (mg/L) pour les différentes stations, par la sonde APHOX-LX en haut et par la sonde EXO en bas. Dans le 1^{er} cas l'hystérésis est négligeable (capteur Pyroscience très rapide), alors qu'elle est marquée pour la sonde EXO2 (capteur YSI lent).

Figure S1: Dissolved oxygen profiles (mg/L) for the different stations, using the APHOX-LX probe above and the EXO probe below. In the first case, hysteresis is insignificant (very rapid Pyroscience sensor), while it is substantial for the EXO2 probe (slow YSI sensor).

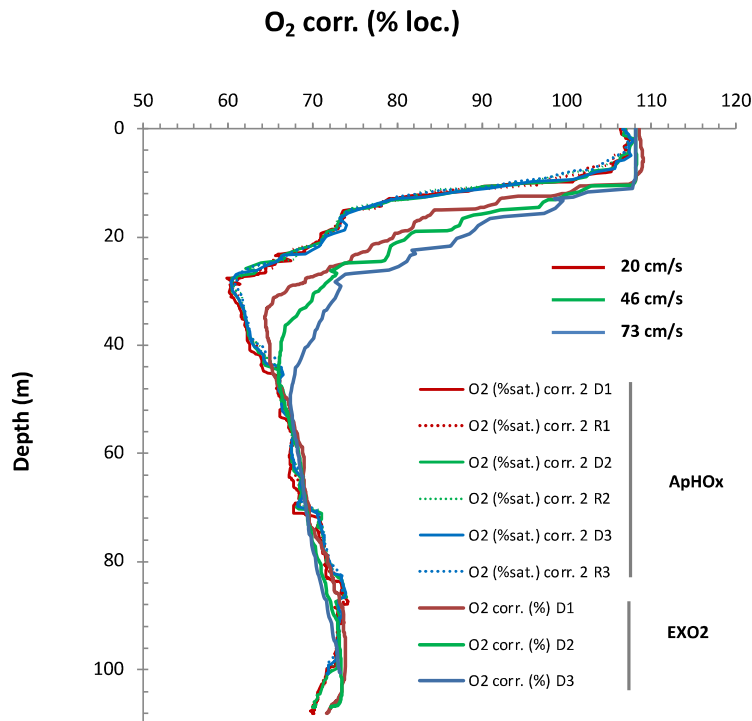


Figure S2 : Profils comparés d'O₂ dissous par la sonde APHOX et par la sonde EXO (station LÉXPLORE, 13/10/2022), réalisés au treuil électrique à 3 vitesses différentes (20, 46 et 73 cm/s). Les données de la sonde APHOX sont tout à fait superposables quelle que soit la vitesse de profilage et entre le 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: Comparison of dissolved oxygen profiles with the APHOX probe and the EXO probe (LÉXPLORE station, 13/10/2022), taken at the electric winch at three different speeds (20, 46, and 73 cm/s). Data from the APHOX probe can be superimposed at all profiling speeds and between the descent (D) ascent (R) directions. The profiles obtained with the EXO2 probe (only the descent direction is illustrated) increasingly deviates from the APHOX profiles when speed increases because of the sensor's excessively slow response time.